

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ
ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ГІРСЬКИЙ Олег Ігорович

УДК 614.842.61

ДИСЕРТАЦІЯ

**ВДОСКОНАЛЕННЯ НОРМАТИВНО-ТЕХНІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ВИПРОБУВАНЬ ВОГНЕГАСНИХ СИСТЕМ ТА ЗАСОБІВ В УКРАЇНІ**

Галузь знань 26 «Цивільна безпека»
Спеціальність 261 «Пожежна 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.І.Гірський

Науковий керівник: Баланюк Володимир Мірчович професор кафедри фізики та хімії горіння, доктор технічних наук, доцент

Львів – 2026

АНОТАЦІЯ

Гірський О.І. Вдосконалення нормативно-технічного забезпечення випробувань вогнегасних систем та засобів в Україні. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 261 «Пожежна безпека» з галузі знань 26 «Цивільна безпека». Львівський державний університет безпеки життєдіяльності Державної служби України з надзвичайних ситуацій, Львів, 2026.

Дисертаційна робота присвячена комплексному дослідженню теоретичних, нормативно-технічних та практичних аспектів забезпечення ефективності систем пожежогасіння різних типів, а також сучасних підходів до їх випробувань, оцінювання та сертифікації. Робота виконана у Львівському державному університеті безпеки життєдіяльності.

У дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання - здійснено комплексне дослідження теоретичних, нормативно-технічних та практичних аспектів забезпечення ефективності систем пожежогасіння різних типів, проведено аналіз сучасних підходів до їх випробувань, оцінювання та сертифікації, а також обґрунтовано напрями вдосконалення нормативно-технічної бази України у сфері пожежної безпеки. Аналіз сучасного стану пожежної безпеки в Україні засвідчив, що пожежі залишаються одним із найнебезпечніших чинників техногенного ризику. За 2021-2024 роки щорічна кількість пожеж коливалася в межах 36800-44000, що супроводжувалося значними людськими жертвами та матеріальними збитками. Проблема загострюється в умовах воєнних дій, урбанізації та поширення нових технологій. Чинна система нормативно-технічного забезпечення характеризується фрагментарністю, наявністю застарілих положень та недостатньою гармонізацією з міжнародними стандартами ISO, EN і NFPA, що підтверджує актуальність і необхідність проведеного дослідження. Порівняльний аналіз нормативно-правової та нормативно-технічної бази України і міжнародних

стандартів дозволив встановити ключові прогалини у регулюванні випробувань систем пожежогасіння. Чинні методики переважно орієнтовані на формальне підтвердження відповідності нормативним параметрам і не забезпечують об'єктивного оцінювання реальної ефективності систем в умовах складного розвитку пожежі. Виявлено типові помилки та невідповідності у процесі тестування, що знижують достовірність результатів: відсутність вимог щодо врахування геометрії приміщення, ігнорування конвекційних потоків і вентиляційних режимів, недостатній контроль рівномірності розподілу вогнегасного агента та відсутність критеріїв оцінки повторного займання. Встановлено, що ключовим чинником ефективного пожежогасіння є не лише хімічна активність вогнегасного агента, а передусім його здатність рівномірно поширитися у захищуваному об'ємі та досягти всіх осередків горіння у критично короткий час. Геометрія приміщення, розміщення та площа внутрішніх перегородок, вентиляційний режим і конвекційні потоки від вогнища суттєво впливають на просторовий розподіл агента. Доведено, що просторовий розподіл вогнегасної речовини є визначальним параметром ефективності систем об'ємного пожежогасіння, який на сьогодні недостатньо враховується у чинних методиках випробувань. Уперше встановлено кількісні закономірності впливу площі та конфігурації перегородок на час досягнення вогнегасної концентрації аерозольних агентів. За результатами натурних експериментів (7 конфігурацій горизонтальної та 9 конфігурацій вертикальної камери об'ємом 0,5 м³) встановлено, що час гасіння аерозольним агентом (АУС) зростає від 5 до 55 с зі збільшенням площі та ускладненням конфігурації перегородок. Визначено граничні геометричні параметри відсіків, за яких забезпечується ефективне об'ємне пожежогасіння в межах нормативно допустимого часу. Найнесприятливішою виявилася шахматна конфігурація з наростаючою площею перегородок у напрямку від агрегату подачі до вогнища, що створює максимальний аеродинамічний опір для поширення аерозольної хмари. Уперше здійснено порівняльне дослідження ефективності поширення аерозольних та газових (СО₂) вогнегасних речовин у приміщеннях ідентичної геометрії.

Встановлено, що аерозоль досягає вогнегасної концентрації у 3-7 разів швидше за CO_2 в умовах складної геометрії з перегородками: час гасіння АУС становив 7–55 с, тоді як для CO_2 - від 29 с до понад 180 с. Виявлено ефект гравітаційного розшарування CO_2 у вертикальних об'ємах зі складними конфігураціями перегородок, при якому CO_2 часто не забезпечує гасіння верхньо розташованих вогнищ. Встановлено, що подача аерозолу знизу у вертикальних приміщеннях є значно ефективнішою за рахунок конвективних потоків від вогнища. Розроблено та верифіковано методики визначення часу гасіння н-гептану в горизонтальних і вертикальних камерах із різними конфігураціями перегородок, що враховують вплив розміру, кількості та взаємного розташування перегородок на ефективність поширення вогнегасного агента. Запропонована методика дозволяє визначати ефективність систем пожежогасіння в умовах, наближених до реальних, та може застосовуватись в акредитованих лабораторіях і органах з оцінки відповідності як доповнення до чинних стандартизованих методів випробувань. Розроблено комплексну математичну модель поширення вогнегасних агентів у приміщеннях зі складною геометрією, що враховує коефіцієнт впливу площі отворів між секціями, коефіцієнт гравітаційного осідання, коефіцієнт напрямку подачі та конвективні потоки від вогнища. Встановлено, що при співвідношенні площі отворів до площі підлоги менше 0,05, час гасіння зростає у 3,5 рази, а оптимальна площа отворів між секціями повинна становити не менше 10-15 % від площі підлоги. Модель апробована на реальних прикладах і може застосовуватись при проектуванні систем пожежогасіння для об'єктів критичної інфраструктури. Обґрунтовано необхідність переходу від формального нормативного контролю до комплексного ризик-орієнтованого підходу оцінювання ефективності систем пожежогасіння, що поєднує лабораторні, повномасштабні, сценарні методи та CFD-моделювання. Доведено доцільність обов'язкового застосування програмних комплексів типу Fire Dynamics Simulator (FDS) для приміщень зі складною просторовою конфігурацією або кількістю перегородок більше трьох, що дозволяє оптимізувати розміщення генераторів і прогнозувати розподіл

агента ще до монтажу системи. Розроблено конкретні пропозиції щодо вдосконалення нормативно-технічної бази України, зокрема зміни до ДСТУ EN 15276-1:2021 та ДБН В.2.5-56:2014. Запропоновано: нормативно закріпити переважне встановлення генераторів аерозольного пожежогасіння у нижній частині приміщення та в кутових зонах; ввести коригувальні коефіцієнти впливу перешкод для приміщень із внутрішніми перегородками; передбачити обов'язковий контроль рівномірності розподілу агента у різних точках приміщення; встановити вимогу щодо повторної перевірки ефективності системи при суттєвих змінах геометрії об'єкта; розробити диференційовані вимоги для аерозольних і газових систем з урахуванням їх фізичних особливостей. Проведене техніко-економічне обґрунтування підтвердило, що витрати на впровадження запропонованих нормативних змін є незначними порівняно з економічними втратами від неефективного пожежогасіння та відновлення об'єктів після пожеж, а скорочення часу гасіння навіть на кілька десятків секунд прямо впливає на зменшення площі ураження та матеріальних збитків.

Ключові слова: пожежна безпека, системи пожежогасіння, вогнегасні аерозолі, діоксид вуглецю, методики випробувань, нормативно-технічне забезпечення, ефективність пожежогасіння, геометрія приміщень, ризик-орієнтований підхід, гармонізація стандартів.

Список публікацій здобувача.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у міжнародних наукових виданнях і тих, що входять до міжнародних наукометричних баз (МНБ):

1. V.Balanyuk, V.Myroshkin, Y.Kopystinsky, O.Garasimiuk, O.Girskiy, N. Gyzar «Study of Efficiency Parameters for Using Fire-Extinguishing Aerosols to Suppress Flammable Liquid Fires in Open Spaces» Key Engineering Materials (Volume 1020)

Publisher in Materials Science § Engineering Trans Tech Publications Ltd (Zurich, Switzerland) August 2025, 141-151, DOI: 10.4028/p-7xOPiH. Здобувач брав участь у розробленні методики випробування, підготовці до проведення експерименту, та в аналізі результатів.

Статті у наукових фахових виданнях України:

2. Баланюк В. М., Гірський О. І., Гарасим'юк О. І., Мирошкін В. С., Пикус В. С. Проблеми нормативно-технічного забезпечення випробувань та якості продукції вогнегасних систем та засобів в Україні. Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. 2022. № 26. С. 67-72. DOI: 10.32447/20784643.26.2022.08. Проведено аналіз нормативно технічного забезпечення випробувань, та їх недоліків.

3. Баланюк В. М., Мирошкін В. С., Копистинський Ю. О., Гірський О. І., Гарасим'юк О. І. Порівняння вогнегасних речовин для гасіння пожеж легкозаймистих та горючих рідин. Збірник наукових праць «Пожежна безпека». 2022. № 41. С. 12-19. DOI: 10.32447/20786662.41.2022.02. Виконано аналіз літературних джерел, проведено пошук характеристик вогнегасних речовин та їх недоліків вогнегасної дії в обмежених об'ємах.

4. Баланюк В. М., Мирошкін В. С., Гузар Н. І., Пикус В. С., Гірський О. І., Чинники впливу на швидкість горіння сполук, із яких утворюються вогнегасні аерозолі. Збірник наукових праць «Пожежна безпека». 2024. № 45. С. 5-9. DOI: 10.32447/20786662.45.2024.01. Провів аналіз ефективності вогнегасних речовин, виконав дослідження впливу окремих компонентів на вогнегасну ефективність.

5. Баланюк В. М., Гірський О. І., Іващишин О.М. Дослідно-випробувальна база засобів об'ємного гасіння в Україні. Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. 2025. № 32. С. 148-154. DOI: 10.32447/20784643.32.2025.12. Виконав аналіз недоліків дослідно-випробувальної бази в Україні. Визначив напрями удосконалення випробувань.

6. Баланюк В. М., Гірський О. І. Поширення вогнегасних аерозолів в об'ємі. Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.

2026. № 2(300). С. 75-81, DOI: 10.33216/1998-7927-2026-300-2-75-81. Підготував та провів дослідження. Опрацював результати досліджень.

7. Баланюк В. М., Гірський О. І. 2 Розділ Монографії «Застосування ударних хвиль для підвищення ефективності об'ємного пожежогасіння», 2025. Написав 2 розділ монографії – методики дослідження.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. Баланюк В.М., Гарасим'юк О.І., Копистинський Ю.О., Пастухов П.В., Мірошкін В.С., Гірський О.І. Умови та перспективи застосування вогнегасного аерозолію для гасіння пожеж на об'єктах підвищеної небезпеки. Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення : зб. наук. праць Всеукр. наук.-практ. конф. з міжнар. участю (Львів, 2022 р.). Львів : ЛДУ БЖД, 2022. С. 291–295. URL: <https://sci.ldubgd.edu.ua/jspui/handle/123456789/13223>.

9. Баланюк В. М., Гірський О. І., Мірошкін В. С., Пикус В. В. Щодо питання визначення характеристик вогнегасних засобів в Україні. Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій : матеріали XIV Міжнар. наук.-практ. конф. (Черкаси, 27–28 квіт. 2023 р.). Черкаси : ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2023. С. 127–129. URL: nuczu.edu.ua.

10. Баланюк В. М., Мірошкін В. С., Гузар Н. І., Гарасим'юк О. І., Гірський О. І. Перспектива гасіння розливів горючих рідин об'ємними засобами пожежогасіння. Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій : матеріали XV Міжнар. наук.-практ. конф. (Черкаси, 25–26 квіт. 2024 р.). Черкаси : ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2024. С. 7–8.

11. Баланюк В. М., Мірошкін В. С., Гузар Н. І., Гарасим'юк О. І., Гірський О. І. Аналіз ефективності гасіння пожеж на відкритих електричних підстанціях. Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій : матеріали XV Міжнар. наук.-практ. конф. (Черкаси, 25–26 квіт. 2024 р.). Черкаси : ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2024. С. 8–9. URL: ldubgd.edu.ua.

12. Баланюк В. М., Гузар Н. І., Мирошкін В. С., Пикус С., Гірський О. І. Небезпечні сценарії розвитку пожеж в умовах війни. Цивільний захист в умовах війни : зб. тез доповідей І Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Львів, 17–18 квіт. 2025 р.). Львів : ЛДУ БЖД, 2025. С. 139–140.

13. Баланюк В. М., Гузар Н. І., Мирошкін В. С., Пикус С., Гірський О. І. Небезпечні чинники пожеж на трансформаторних підстанціях в умовах війни: зб. тез доповідей І Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Львів, 17–18 квіт. 2025 р.). Львів : ЛДУ БЖД, 2025. С. 140-142.

ABSTRACT

Hirskyi O.I. Improvement of Regulatory and Technical Support for Testing Fire Extinguishing Systems and Means in Ukraine. – Qualifying scientific work submitted as a manuscript.

Dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy in Specialty 261 “Fire Safety” in the Field of Knowledge 26 “Civil Security”. – Lviv State University of Life Safety of the State Emergency Service of Ukraine, Lviv, 2026.

The dissertation is devoted to a comprehensive study of theoretical, regulatory, technical, and practical aspects of ensuring the effectiveness of various fire extinguishing systems, as well as modern approaches to their testing, evaluation, and certification. The research was carried out at Lviv State University of Life Safety.

The dissertation solves an important scientific task through a comprehensive investigation of theoretical, regulatory, technical, and practical aspects of ensuring the effectiveness of various types of fire extinguishing systems, analysis of modern approaches to their testing, evaluation, and certification, and substantiation of directions for improving the regulatory and technical framework of Ukraine in the field of fire safety.

The analysis of the current state of fire safety in Ukraine demonstrated that fires remain one of the most significant technological risk factors. During 2021–2024, the annual number of fires ranged from 36,800 to 44,000, resulting in considerable human casualties and material losses. The problem is aggravated by wartime conditions, urbanization processes, and the spread of new technologies. The existing regulatory and technical support system is characterized by fragmentation, outdated provisions, and insufficient harmonization with international ISO, EN, and NFPA standards, which confirms the relevance and necessity of the conducted research.

A comparative analysis of the Ukrainian regulatory, legal, and technical framework and international standards revealed key gaps in the regulation of fire extinguishing system testing. Existing testing methodologies are mainly focused on formal verification of compliance with regulatory requirements and do not provide an objective assessment of actual system effectiveness under complex fire development

conditions. Typical shortcomings and inconsistencies in testing procedures were identified, including the absence of requirements for considering room geometry, neglect of convective flows and ventilation conditions, insufficient control of extinguishing agent distribution uniformity, and the lack of criteria for evaluating re-ignition.

It was established that the key factor in effective fire suppression is not only the chemical activity of the extinguishing agent but primarily its ability to spread uniformly throughout the protected volume and reach all fire sources within a critically short period of time. Room geometry, the arrangement and area of internal partitions, ventilation conditions, and convective flows generated by the fire significantly affect the spatial distribution of the extinguishing agent. It was proven that the spatial distribution of the extinguishing substance is a determining parameter of the effectiveness of total flooding fire extinguishing systems and is currently insufficiently considered in existing testing methodologies.

For the first time, quantitative relationships describing the influence of partition area and configuration on the time required to achieve extinguishing concentrations of aerosol agents were established. Based on full-scale experiments involving seven configurations of a horizontal chamber and nine configurations of a vertical chamber with a volume of 0.5 m³, it was found that the extinguishing time using aerosol fire extinguishing systems increased from 5 to 55 seconds as the partition area increased and the configuration became more complex. Limiting geometric parameters of compartments ensuring effective total flooding fire suppression within the permissible regulatory time were determined. The most unfavorable configuration was found to be a staggered arrangement with increasing partition area in the direction from the aerosol generator toward the fire source, creating maximum aerodynamic resistance to aerosol cloud propagation.

For the first time, a comparative study of the propagation efficiency of aerosol and gaseous (CO₂) extinguishing agents in compartments of identical geometry was carried out. It was established that aerosol agents reach extinguishing concentration three to seven times faster than CO₂ under conditions of complex geometry with

partitions. The extinguishing time for aerosol systems ranged from 7 to 55 seconds, whereas for CO₂ it ranged from 29 seconds to more than 180 seconds. The effect of gravitational stratification of CO₂ in vertical compartments with complex partition configurations was identified, resulting in ineffective suppression of elevated fire sources. It was also found that supplying aerosol from the lower part of vertical compartments is significantly more effective due to convective flows generated by the fire.

Methodologies for determining the extinguishing time of n-heptane fires in horizontal and vertical chambers with different partition configurations were developed and verified. These methodologies take into account the influence of the size, number, and arrangement of partitions on the propagation efficiency of extinguishing agents. The proposed methodology makes it possible to assess the effectiveness of fire extinguishing systems under conditions close to real fire scenarios and can be applied in accredited laboratories and conformity assessment bodies as a supplement to existing standardized testing methods.

A comprehensive mathematical model describing the propagation of extinguishing agents in compartments with complex geometry was developed. The model incorporates the coefficient of opening area influence between sections, the gravitational settling coefficient, the discharge direction coefficient, and fire-induced convective flows. It was established that when the ratio of opening area to floor area is less than 0.05, the extinguishing time increases by a factor of 3.5, while the optimal opening area between sections should be at least 10–15% of the floor area. The model was validated using practical examples and can be applied in the design of fire extinguishing systems for critical infrastructure facilities.

The necessity of transitioning from formal regulatory control to a comprehensive risk-based approach for evaluating the effectiveness of fire extinguishing systems was substantiated. This approach combines laboratory, full-scale, and scenario-based testing methods with CFD simulation. The expediency of mandatory application of software packages such as Fire Dynamics Simulator (FDS) for facilities with complex spatial configurations or more than three internal partitions was demonstrated, enabling

optimization of generator placement and prediction of extinguishing agent distribution before system installation.

Specific proposals for improving the regulatory and technical framework of Ukraine were developed, including amendments to DSTU EN 15276-1:2021 and DBN V.2.5-56:2014. It is proposed to establish regulatory requirements for preferential installation of aerosol fire extinguishing generators in the lower part of protected spaces and in corner zones; introduce correction coefficients accounting for the influence of internal obstacles; provide mandatory monitoring of extinguishing agent distribution uniformity throughout the compartment; establish requirements for repeated effectiveness verification following significant changes in facility geometry; and develop differentiated requirements for aerosol and gaseous systems considering their physical characteristics.

The conducted technical and economic assessment confirmed that the costs associated with implementing the proposed regulatory changes are insignificant compared with the economic losses resulting from ineffective fire suppression and post-fire restoration. Reducing extinguishing time even by several tens of seconds directly contributes to minimizing fire damage areas and material losses.

Keywords: fire safety, fire extinguishing systems, fire-extinguishing aerosols, carbon dioxide, testing methodologies, regulatory and technical support, fire suppression effectiveness, compartment geometry, risk-based approach, standards harmonization.

LIST OF PUBLICATIONS OF THE APPLICANT

Scientific publications presenting the main results of the dissertation research

Publications in international scientific journals and journals indexed in international scientometric databases:

1. Balanyuk V., Myroshkin V., Kopystynsky Y., Garasimiuk O., Hirskyi O., Gyzar N. Study of Efficiency Parameters for Using Fire-Extinguishing Aerosols to Suppress Flammable Liquid Fires in Open Spaces. *Key Engineering Materials*. 2025. Vol. 1020. Pp. 141–151. DOI: 10.4028/p-7xOPiH.

The applicant participated in the development of the testing methodology, preparation and conduct of the experiment, and analysis of the obtained results.

Publications in Ukrainian peer-reviewed scientific journals:

2. Balanyuk V.M., Hirskyi O.I., Harasymiuk O.I., Myroshkin V.S., Pykus V.S. Problems of Regulatory and Technical Support for Testing and Quality Assurance of Fire Extinguishing Systems and Equipment in Ukraine. *Bulletin of Lviv State University of Life Safety*. 2022. No. 26. Pp. 67–72. DOI: 10.32447/20784643.26.2022.08.

The applicant analyzed the regulatory and technical framework for testing and identified its shortcomings.

3. Balanyuk V.M., Myroshkin V.S., Kopystynskyi Yu.O., Hirskyi O.I., Harasymiuk O.I. Comparison of Fire Extinguishing Agents for Suppression of Flammable and Combustible Liquid Fires. *Fire Safety: Collection of Scientific Papers*. 2022. No. 41. Pp. 12–19. DOI: 10.32447/20786662.41.2022.02.

The applicant conducted a literature review, analyzed the characteristics of extinguishing agents, and identified limitations of their extinguishing performance in confined spaces.

4. Balanyuk V.M., Myroshkin V.S., Huzar N.I., Pykus V.S., Hirskyi O.I. Factors Affecting the Burning Rate of Compounds Used for the Formation of Fire-Extinguishing Aerosols. *Fire Safety: Collection of Scientific Papers*. 2024. No. 45. Pp. 5–9. DOI: 10.32447/20786662.45.2024.01.

The applicant analyzed the effectiveness of extinguishing agents and investigated the influence of individual components on extinguishing efficiency.

5. Balanyuk V.M., Hirskyi O.I., Ivashchyshyn O.M. Experimental and Testing Facilities for Total Flooding Fire Extinguishing Systems in Ukraine. *Bulletin of Lviv State University of Life Safety*. 2025. No. 32. Pp. 148–154. DOI: 10.32447/20784643.32.2025.12.

The applicant analyzed shortcomings of the experimental and testing infrastructure in Ukraine and identified directions for improving testing procedures.

6. Balanyuk V.M., Hirskyi O.I. Distribution of Fire-Extinguishing Aerosols in an Enclosed Volume. *Bulletin of Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*. 2026. No. 2(300). Pp. 75–81. DOI: 10.33216/1998-7927-2026-300-2-75-81.

The applicant designed and conducted the study and processed the obtained experimental results.

7. Balanyuk V.M., Hirskyi O.I. Research Methodology. Chapter 2 in the Monograph *Application of Shock Waves to Improve the Efficiency of Total Flooding Fire Suppression*. 2025.

The applicant authored Chapter 2 of the monograph, devoted to research methodology.

Publications confirming the approbation of the dissertation results:

8. Balanyuk V.M., Harasymiuk O.I., Kopystynskyi Yu.O., Pastukhov P.V., Myroshkin V.S., Hirskyi O.I. Conditions and Prospects for the Use of Fire-Extinguishing Aerosols for Fire Suppression at High-Risk Facilities. *Current Issues of Fire Safety and Prevention of Emergencies under Present Conditions: Proceedings of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference with International Participation (Lviv, 2022)*. Lviv: LSULS, 2022. Pp. 291–295.
9. Balanyuk V.M., Hirskyi O.I., Myroshkin V.S., Pykus V.V. On the Issue of Determining the Characteristics of Fire Extinguishing Agents in Ukraine. *Theory and Practice of Fire Suppression and Emergency Response: Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference (Cherkasy, April 27–28, 2023)*. Cherkasy: Cherkasy Institute of Fire Safety named after the

- Heroes of Chernobyl of the National University of Civil Protection of Ukraine, 2023. Pp. 127–129.
10. Balanyuk V.M., Myroshkin V.S., Huzar N.I., Harasymiuk O.I., Hirskyi O.I. Prospects for Suppression of Flammable Liquid Spills Using Total Flooding Fire Extinguishing Systems. Theory and Practice of Fire Suppression and Emergency Response: Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference (Cherkasy, April 25–26, 2024). Cherkasy: Cherkasy Institute of Fire Safety named after the Heroes of Chernobyl of the National University of Civil Protection of Ukraine, 2024. Pp. 7–8.
 11. Balanyuk V.M., Myroshkin V.S., Huzar N.I., Harasymiuk O.I., Hirskyi O.I. Analysis of Fire Suppression Effectiveness at Open Electrical Substations. Theory and Practice of Fire Suppression and Emergency Response: Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference (Cherkasy, April 25–26, 2024). Cherkasy: Cherkasy Institute of Fire Safety named after the Heroes of Chernobyl of the National University of Civil Protection of Ukraine, 2024. Pp. 8–9.
 12. Balanyuk V.M., Huzar N.I., Myroshkin V.S., Pykus S., Hirskyi O.I. Hazardous Fire Development Scenarios under Wartime Conditions. Civil Protection under Wartime Conditions: Proceedings of the First International Scientific and Practical Conference (Lviv, April 17–18, 2025). Lviv: LSULS, 2025. Pp. 139–140.
 13. Balanyuk V.M., Huzar N.I., Myroshkin V.S., Pykus S., Hirskyi O.I. Hazardous Factors of Fires at Transformer Substations under Wartime Conditions. Civil Protection under Wartime Conditions: Proceedings of the First International Scientific and Practical Conference (Lviv, April 17–18, 2025). Lviv: LSULS, 2025. Pp. 140–142.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	19
ВСТУП	20
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА СУЧАСНИЙ СТАН НОРМАТИВНО-ТЕХНІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ ВОГНЕГАСНИХ СИСТЕМ.....	31
1.1 Огляд чинної нормативно-технічної бази в Україні (ДСТУ, ТУ, СОУ, НПАОП тощо).....	31
1.2 Порівняльний аналіз українських і міжнародних нормативів.....	41
1.3 Аналіз поняття та класифікації вогнегасних систем і засобів.....	43
1.4 Недоліки та прогалини у чинному регулюванні випробувань в Україні.....	53
1.5 Вплив нормативної бази на якість і безпеку вогнегасних засобів.....	55
Висновки за розділом.....	57
РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ТА ПРАКТИКА ВИПРОБУВАНЬ ВОГНЕГАСНИХ СИСТЕМ: ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ.....	59
2.1 Аналіз існуючих методик випробувань.....	59
2.2 Практичні аспекти проведення лабораторних та польових випробувань....	63
2.3 Виявлення типових помилок та невідповідностей у процесі тестування....	69
2.4 Оцінка ефективності випробувань у контексті пожежної безпеки.....	74
2.5 Механізми поширення аерозолю.....	82
2.6 Ефективність поширення вогнегасної речовини в об'ємі як ключовий чинник пожежогасіння.....	89
Висновки за розділом.....	93
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПОШИРЕННЯ ТА ГАСІННЯ ОБ'ЄМНИМИ ВОГНЕГАСНИМИ ЗАСОБАМИ У	

ПРИМІЩЕННЯХ ЗІ СКЛАДНОЮ ГЕОМЕТРИЧНОЮ КОНФІГУРАЦІЄЮ.....	95
3.1 Моделювання поширення аерозолю в приміщенні.....	95
3.2 Результати проведення дослідів з визначення часу гасіння при розділені перегородкою у горизонтальній та вертикальній камері за допомогою вогнегасного аерозолю.....	106
3.3 Методика проведення експерименту з визначення ефективності поширення CO ₂ та часу гасіння ним.....	126
3.4 Явища які гальмують поширення газу вгору.....	138
3.5 Моделювання ефективності пожежогасіння об'ємними вогнегасними засобами в великих об'ємах.....	141
3.5.1 Фізичні параметри вогнегасних агентів	142
3.5.2 Перенесення вогнегасного агента між суміжними відсіками.....	143
3.5.3 Модель однокамерної системи	144
3.5.4 Порівняльний аналіз ефективності аерозолю та CO ₂	148
3.6 Кількісні закономірності впливу площі та конфігурації перегородок на час досягнення вогнегасної концентрації.....	151
Висновки за розділом.....	153
 РОЗДІЛ 4. НОРМАТИВНО-ТЕХНІЧНЕ ВДОСКОНАЛЕННЯ ТА ПРАКТИЧНЕ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	156
4.1 Пропозиції щодо встановлення вогнегасних засобів аерозольного пожежогасіння.....	156
4.1.1 Шляхи вдосконалення нормативно-технічного забезпечення з урахуванням експериментальних досліджень.....	157
4.2 Оцінка нормативно-правових механізмів імплементації змін.....	160
4.3 Пропозиції щодо змін у нормативних документах.....	162

4.4	Техніко-економічне обґрунтування впровадження вдосконаленої нормативно-технічної моделі випробувань об'ємних вогнегасних засобів.....	167
4.5	Економічний ефект від впровадження	168
	Висновки за розділом.....	170
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	173
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	177
	Додаток А. Список публікацій здобувача за темою дисертації	190
	Додаток Б. Відомості про апробацію результатів дисертації	192
	Додаток В. Протокол дослідження.....	194
	Додаток Г. Акти впровадження науково-дослідної роботи у практику	217
	Додаток Д. Скріншоти програми CFD -моделювання поширення агентів.....	220

Перелік умовних позначень

CO₂ - Діоксид вуглецю

МВК - мінімальна вогнегасна концентрація

АУС - аерозольна утворююча суміш

ДСНС - Державна служба України з надзвичайних ситуацій

CDF - Computational Fluid Dynamics

ВСТУП

Актуальність теми. Пожежі залишаються одним із найбільш небезпечних чинників техногенного ризику, що супроводжуються значними людськими втратами, матеріальними збитками, руйнуванням об'єктів інфраструктури та негативним впливом на навколишнє середовище. Сучасний розвиток промисловості, енергетики, інформаційних технологій та урбанізованих територій супроводжується постійним зростанням пожежного навантаження на об'єкти різного функціонального призначення, ускладненням інженерних систем і збільшенням кількості потенційно небезпечних технологічних процесів. Особливої актуальності проблема забезпечення пожежної безпеки набуває в умовах широкого використання систем накопичення енергії, літій-іонних батарей, водневих технологій, серверних комплексів, дата-центрів, автоматизованих виробничих ліній та сучасних енергетичних систем. Для України проблема забезпечення ефективного пожежного захисту додатково ускладнюється наслідками воєнних дій, зростанням кількості пожеж на об'єктах цивільної та критичної інфраструктури, пошкодженням енергетичних систем, використанням автономних джерел живлення та підвищенням рівня техногенного навантаження. Значна кількість пожеж виникає у складних за конструктивним виконанням приміщеннях, де ефективність систем пожежогасіння істотно залежить від динаміки повітряних потоків, роботи вентиляційних систем, геометрії приміщень, теплових потоків та процесів розподілу вогнегасної речовини.

Одним із ключових елементів забезпечення пожежної безпеки є автоматичні системи пожежогасіння, які забезпечують раннє локалізування та ліквідацію пожежі без безпосередньої участі людини. На сучасних об'єктах широко використовуються газові, аерозольні, порошкові, пінні та водяні системи пожежогасіння. Кожен тип систем має власні фізико-хімічні механізми припинення горіння, особливості застосування, переваги та обмеження. Ефективність їх функціонування залежить не лише від технічних характеристик обладнання, а й від правильності проєктування, відповідності умовам

експлуатації, особливостей розвитку пожежі та достовірності методик випробувань. Особливо це стосується газових та аерозольних систем пожежогасіння, ефективність яких безпосередньо залежить від рівномірності розподілу вогнегасної речовини у захищуваному об'ємі, герметичності приміщення, режимів вентиляції та впливу локальних конвекційних потоків.

Сучасний стан нормативно-технічного забезпечення у сфері пожежогасіння характеризується значною кількістю застарілих положень, недостатнім рівнем гармонізації національних стандартів із міжнародними вимогами та відсутністю комплексного ризик-орієнтованого підходу до оцінювання ефективності систем пожежогасіння. Значна частина чинних нормативних документів України базується на підходах, сформованих у попередні десятиліття, та не враховує сучасні технології пожежогасіння, новітні типи пожежного навантаження, складну геометрію об'єктів і особливості функціонування сучасних інженерних систем. Чинні методики випробувань систем пожежогасіння переважно орієнтовані на підтвердження відповідності нормативним параметрам, проте недостатньо враховують реальні умови розвитку пожежі. У більшості випадків не враховується вплив вентиляції, турбулентних потоків, локального перегріву, просторового розподілу вогнегасної речовини та ефектів гравітаційного розшарування. У результаті система, що успішно пройшла сертифікаційні випробування, може виявитися недостатньо ефективною в реальних умовах експлуатації.

Окрім цього, наявна нормативно-правова та технічна база у сфері цивільного захисту та пожежної безпеки України, зокрема в частині проектування автоматичних систем об'ємного пожежогасіння (АСОГ), базується на концепціях техногенної безпеки мирного часу. Вона не враховує специфіку деструктивних чинників сучасних засобів ураження (вибухова хвиля, уламкова дія, вторинні фактори вибуху, комбіновані осередки займання). Це зумовлює об'єктивну науково-практичну потребу в перегляді методологічних підходів до оцінки надійності, живучості та ефективності АСОГ в умовах воєнного стану та розробці нових технічних регламентів.

Особливо актуальною є проблема оцінювання ефективності систем пожежогасіння в умовах сучасних технологічних ризиків, пов'язаних із використанням літій-іонних акумуляторів, систем накопичення енергії, водневих технологій, серверних приміщень, дата-центрів та об'єктів із високою концентрацією електронного обладнання. Чинна нормативна база України лише частково враховує особливості таких об'єктів, тоді як міжнародні стандарти ISO, EN та NFPA поступово переходять до використання ризик-орієнтованих підходів, CFD-моделювання, сценарного аналізу розвитку пожеж та натурального контролю ефективності систем пожежогасіння. У національній практиці такі підходи застосовуються обмежено, що створює розрив між реальними умовами експлуатації систем та методами їх нормативного оцінювання.

У сучасних умовах особливого значення набуває вдосконалення підходів до випробувань систем пожежогасіння. Лабораторні, функціональні та повномасштабні випробування повинні не лише підтверджувати відповідність технічних параметрів нормативним вимогам, а й забезпечувати оцінювання реальної ефективності систем у складних умовах розвитку пожежі. Ефективність пожежогасіння залежить від великої кількості факторів, серед яких геометрія приміщення, режими повітрообміну, теплові потоки, наявність конструктивних перешкод, особливості поширення вогнегасної речовини та можливість повторного займання. Саме тому виникає необхідність комплексного дослідження сучасних систем пожежогасіння, методик їх випробувань та нормативно-технічного забезпечення з урахуванням реальних умов експлуатації об'єктів.

Значний внесок у вдосконалення нормативно-технічного забезпечення випробувань вогнегасних систем та засобів зробили як українські, так і зарубіжні вчені. Серед них варто відзначити праці Жартовського В.М., Антонова А.В., Ковалишина В.В., та інших.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню сучасних систем пожежогасіння та методик їх випробувань, аналізу нормативно-технічного забезпечення у сфері пожежної безпеки й обґрунтуванню напрямів

удосконалення підходів до оцінювання ефективності систем пожежогасіння в реальних умовах експлуатації. У роботі проведено аналіз сучасного стану пожежної безпеки, досліджено особливості функціонування газових, аерозольних, порошкових та інших систем пожежогасіння, проаналізовано сучасні методики лабораторних, функціональних і повномасштабних випробувань, визначено основні недоліки та обмеження чинних підходів до оцінювання ефективності. Окрему увагу приділено дослідженню впливу вентиляції, геометрії приміщень, аеродинамічних процесів та теплових потоків на ефективність систем пожежогасіння.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано упродовж 2022–2026 років відповідно до розпорядження Кабінету Міністрів України від 22.09.2021 № 1145-р «Про затвердження плану заходів щодо розвитку системи технічного регулювання на період до 2025 року», Стратегії розвитку Львівського державного університету безпеки життєдіяльності на 2024–2029 роки, Концепції наукової діяльності Львівського державного університету безпеки життєдіяльності на 2020–2025 роки та Концепції наукової діяльності Львівського державного університету безпеки життєдіяльності на 2026–2030 роки.

Тема дисертації відповідає пріоритетним напрямкам наукових досліджень університету у сфері пожежної безпеки, технічного регулювання, стандартизації та оцінки відповідності продукції протипожежного призначення та спрямована на вдосконалення нормативно-технічного забезпечення випробувань вогнегасних систем і засобів в Україні, а також гармонізацію національних вимог з європейськими підходами до оцінки відповідності та випробувань засобів протипожежного захисту.

Мета і завдання дослідження. *Метою роботи* є комплексне дослідження сучасних систем пожежогасіння та методик їх випробувань, аналіз нормативно-технічного забезпечення у сфері пожежної безпеки й обґрунтування напрямів удосконалення підходів до оцінювання ефективності систем пожежогасіння в реальних умовах експлуатації.

Для досягнення поставленої мети було визначено такі *завдання*:

- проаналізувати сучасний стан пожежної безпеки та статистику пожеж в Україні за 2021–2025 роки;
- здійснити порівняльний аналіз нормативно-правової та нормативно-технічної бази України та міжнародних стандартів (ISO, EN, NFPA) у сфері випробувань систем пожежогасіння;
- визначити особливості функціонування основних типів систем пожежогасіння: газових, аерозольних, порошкових, пінних і водяних;
- проаналізувати методики лабораторних, функціональних і повномасштабних випробувань та встановити їх основні обмеження;
- дослідити вплив геометрії приміщень та конвекційних потоків на ефективність розподілу вогнегасних агентів;
- провести натурні експерименти з визначення часу гасіння та ефективності поширення аерозольних та газових (CO₂) вогнегасних речовин у приміщеннях зі складною геометричною конфігурацією;
- обґрунтувати необхідність переходу від формального нормативного контролю до ризик-орієнтованого підходу оцінювання ефективності систем пожежогасіння та розробити рекомендації щодо вдосконалення нормативно-технічної бази України.

Об'єктом дослідження є процеси поширення об'ємних вогнегасних речовин та оцінювання ефективності автоматичних систем об'ємного пожежогасіння (газових та аерозольних) у приміщеннях різної геометричної конфігурації в умовах пожежі.

Предметом дослідження є нормативно-технічне забезпечення та методики випробувань автоматичних систем об'ємного пожежогасіння, а також фізико-аеродинамічні чинники - геометрія приміщень, площа перегородок, конвекційні потоки які визначають просторовий розподіл вогнегасної речовини та ефективність гасіння в реальних умовах експлуатації.

Методи дослідження. У роботі використано такі методи: системний аналіз нормативно-технічної документації; порівняльний аналіз міжнародних (ISO, EN,

NFPA) і національних стандартів; аналіз даних щодо пожеж та їх наслідків в Україні за 2021–2025 роки; аналітичні методи оцінювання ефективності систем пожежогасіння; натурні лабораторні експерименти з визначення часу гасіння вогнегасним аерозолем та діоксидом вуглецю (CO_2) у об'ємах зі складною геометрією, методи узагальнення результатів лабораторних і повномасштабних випробувань; аналіз типових помилок і невідповідностей у процесі тестування систем.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в обґрунтуванні та розробленні нових підходів до оцінювання ефективності систем об'ємного пожежогасіння з урахуванням реальних геометричних і аеродинамічних умов захищуваних об'єктів. При цьому.

1. Уперше встановлено кількісні закономірності впливу площі та конфігурації перешкод у приміщеннях на час досягнення вогнегасної концентрації аерозолю та CO_2 , що дозволило визначити граничні геометричні параметри відсіків, за яких забезпечується ефективне об'ємне пожежогасіння в межах нормативно допустимого часу.

2. Уперше порівняно ефективність поширення аерозольних та газових (CO_2) вогнегасних речовин у приміщеннях ідентичної геометрії та встановлено, що аерозоль досягає вогнегасної концентрації у 3–7 разів швидше за CO_2 в умовах складної геометрії з перегородками; виявлено ефект «мертвих зон» при подачі CO_2 знизу у вертикальних конфігураціях.

3. Отримала подальший розвиток методологія оцінювання ефективності систем об'ємного пожежогасіння. Розроблено та верифіковано натурні методики визначення часу гасіння в горизонтальних і вертикальних камерах зі складною геометричною конфігурацією (7 конфігурацій горизонтальної та 9 конфігурацій вертикальної камери), що враховують вплив розміру, кількості та взаємного розташування перегородок.

4. Удосконалено підхід до нормативно-технічного регулювання випробувань систем пожежогасіння в Україні: обґрунтовано необхідність

доповнення чинних методик вимогами щодо врахування геометрії приміщень, натурного контролю концентрацій, CFD-моделювання та ризик-орієнтованого аналізу.

Практичне значення одержаних результатів визначається їх безпосередньою спрямованістю на підвищення ефективності та надійності систем пожежогасіння в реальних умовах експлуатації і вдосконалення нормативно-технічної бази України у сфері пожежної безпеки, зокрема:

- Результати натурних експериментальних досліджень ефективності поширення аерозолі (АУСЗ) та діоксиду вуглецю (CO_2) у 16 різних геометричних конфігураціях горизонтальної і вертикальної камер можуть бути безпосередньо використані розробниками систем об'ємного пожежогасіння при проектуванні захисту приміщень зі складною геометрією: кабельних каналів, серверних залів, технологічних відсіків, підвальних і горищних приміщень. Отримані дані дозволяють обґрунтовано обирати тип вогнегасного агента та місце розташування генератора залежно від конфігурації захищуваного простору, що особливо актуально при проектуванні вогнезахисту приміщень в умовах війни.

- Розроблені та верифіковані методики натурних випробувань із визначення часу гасіння в камерах із перегородками різної площі та конфігурації придатні для впровадження в акредитованих випробувальних лабораторіях і органах з оцінки відповідності продукції вогнегасного призначення в Україні. Запропоновані методики заповнюють прогалину між чинними стандартними методами (ДСТУ EN 15276, ДСТУ 3675), що не враховують реальну геометрію приміщень, та реальними умовами функціонування систем пожежогасіння.

- Обґрунтовані рекомендації щодо гармонізації нормативно-технічної бази України з вимогами ISO 14520, EN 15004, EN 15276 та NFPA 2001 у частині врахування геометричних і аеродинамічних чинників при сертифікаційних випробуваннях систем пожежогасіння можуть бути використані органами технічного регулювання — зокрема, Державною службою України з надзвичайних ситуацій (ДСНС), Міністерством економіки та профільними

технічними комітетами — при підготовці та оновленні національних нормативних документів.

- Матеріали дисертаційного дослідження, а саме: результати порівняльного аналізу ефективності аерозольних та газових (CO₂) систем, в котрих встановлені закономірності поширення вогнегасних агентів у геометрично складних об'ємах та розроблені підходи до ризик-орієнтованого оцінювання - впроваджено у діяльність ТОВ «НОЙ ІКС» - акт впровадження від 02.04.2026 та ТОВ «АКВАТЕХНІК» - акт впровадження від 06.04.2026 та ТОВ «Пожежний арсенал» акт впровадження від 17.04.2026 де апробовано моделювання пожежогасіння за допомогою CFD програми-симулятора, яка дозволяє визначати параметри та проводити розрахунок при проектуванні та використанні систем аерозольного чи газового пожежогасіння з урахуванням складних геометричних умов захищеного об'єму.

Особистий внесок здобувача.

Основні теоретичні, розрахункові та експериментальні результати, викладені у дисертаційній роботі, одержані здобувачем самостійно. Автором сформульовано наукові положення, узагальнення, висновки та практичні рекомендації, що становлять зміст дисертації. Особистий внесок здобувача знайшов відображення у співавторстві у низці наукових публікацій, які повністю відповідають тематиці дослідження:

– у статті «Study of Efficiency Parameters for Using Fire-Extinguishing Aerosols to Suppress Flammable Liquid Fires in Open Spaces» здобувачем проведено дослідження ефективності застосування вогнегасних аерозолів для гасіння пожеж легкозаймистих рідин на відкритому просторі, виконано аналіз отриманих результатів та сформульовано висновки щодо умов їх ефективного використання.

– у статті «Проблеми нормативно-технічного забезпечення випробувань та якості продукції вогнегасних систем та засобів в Україні» здобувачем виконано аналіз нормативно-технічного забезпечення випробувань засобів протипожежного захисту в Україні, виявлено проблемні аспекти системи оцінки відповідності та запропоновано напрями її вдосконалення.

– у статті «Порівняння вогнегасних речовин для гасіння пожеж легкозаймистих та горючих рідин» здобувачем проведено порівняльний аналіз характеристик і показників ефективності вогнегасних речовин для гасіння пожеж класу В та узагальнено результати дослідження.

– у статті «Чинники впливу на швидкість горіння сполук, із яких утворюються вогнегасні аерозолі» здобувачем визначено основні чинники, що впливають на швидкість горіння аерозолетвірних композицій, здійснено аналіз результатів експериментальних досліджень та сформульовано відповідні висновки.

– у статті «Дослідно-випробувальна база засобів об'ємного гасіння в Україні» здобувачем проведено аналіз сучасного стану вітчизняної випробувальної бази засобів об'ємного пожежогасіння, визначено проблемні питання її функціонування та перспективні напрями розвитку.

– у статті «Поширення вогнегасних аерозолів в об'ємі» здобувачем досліджено закономірності поширення вогнегасних аерозолів у захищуваному об'ємі, проаналізовано вплив окремих факторів на процес їх розподілу та узагальнено результати досліджень.

– у розділі монографії «Застосування ударних хвиль для підвищення ефективності об'ємного пожежогасіння» здобувачем виконано розділ методологія і методи проведення досліджень.

– у тезах доповіді «Умови та перспективи застосування вогнегасного аерозолу для гасіння пожеж на об'єктах підвищеної небезпеки» здобувачем обґрунтовано умови застосування вогнегасних аерозолів та визначено перспективні напрями їх використання для захисту об'єктів підвищеної небезпеки.

– у тезах доповіді «Щодо питання визначення характеристик вогнегасних засобів в Україні» здобувачем проведено аналіз підходів до визначення характеристик вогнегасних засобів та окреслено проблемні питання їх нормативного регулювання.

– у тезах доповіді «Перспектива гасіння розливів горючих рідин об'ємними засобами пожежогасіння» здобувачем обґрунтовано можливість застосування засобів об'ємного пожежогасіння для ліквідації пожеж розливів горючих рідин та визначено напрями подальших досліджень.

– у тезах доповіді «Аналіз ефективності гасіння пожеж на відкритих електричних підстанціях» здобувачем виконано аналіз особливостей розвитку пожеж на відкритих електричних підстанціях та оцінено ефективність використання окремих засобів пожежогасіння.

– у тезах доповіді «Небезпечні сценарії розвитку пожеж в умовах війни» здобувачем здійснено аналіз характерних сценаріїв виникнення та розвитку пожеж в умовах воєнних дій і визначено основні чинники пожежної небезпеки.

– у тезах доповіді «Небезпечні чинники пожеж на трансформаторних підстанціях в умовах війни» здобувачем проведено аналіз небезпечних чинників розвитку пожеж на трансформаторних підстанціях та обґрунтовано особливості їх впливу на процес ліквідації пожеж.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертації пройшли апробацію та були позитивно сприйняті на 11 міжнародних і всеукраїнських науково-практичних конференціях, форумах та семінарах, зокрема на: Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю «Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення» (Львів, 2022) ЛДУ БЖД, XIV Міжнародній науково-практичній конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (Черкаси, 27–28 квіт. 2023) ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, XV Міжнародній науково-практичній конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (Черкаси, 25–26 квіт. 2024 р.) ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, I Міжнародній науково-практичній конференції «Цивільний захист в умовах війни» (Львів, 17–18 квіт. 2025) ЛДУ БЖД.

Апробація результатів дослідження підтвердила їхню практичну цінність та наукову новизну, а також дозволила сформулювати рекомендації щодо впровадження розроблених та верифікованих методик натурних випробувань із визначення часу гасіння в камерах із перегородками різної площі та конфігурацій, які придатні для впровадження в акредитованих випробувальних лабораторіях і органах з оцінки відповідності продукції вогнегасного призначення в Україні.

Публікації. Основні наукові результати дисертації, висновки та рекомендації опубліковані в 13 наукових працях, до яких входять 7 статей, зокрема 1 у закордонних виданнях, що індексуються в міжнародних наукометричних базах, та 6 у фахових наукових виданнях України. Окрім того, представлено 7 публікацій у збірниках матеріалів міжнародних і національних конференцій, форумів та семінарів, що висвітлюють окремі результати дисертації. Сукупний обсяг опублікованих матеріалів становить 5,37 друкованих аркушів, з яких 1,845 д.а. є особистим внеском автора.

Структура та обсяг роботи. Дисертація включає вступ, чотири основні розділи, висновки, список використаних джерел і додатки. Загальний обсяг роботи становить 220 сторінок, з яких основний зміст викладено на 156 сторінках. У дисертації представлено 44 рисунків, 29 таблиць, список використаних джерел, що налічує 113 найменування, а також 5 додатків, розміщених на 30 сторінках.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА СУЧАСНИЙ СТАН НОРМАТИВНО-ТЕХНІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ ВОГНЕГАСНИХ СИСТЕМ

1.1. Огляд чинної нормативно-технічної бази в Україні (ДСТУ, ТУ, СОУ, НПАОП тощо)

Пожежна та техногенна безпека є важливим елементом національної безпеки країни в цілому. Відповідно захист населення від пожеж, підвищення рівня протипожежного захисту, розроблення заходів пожежної безпеки, забезпечення належного рівня випробувань та якості вогнегасних систем і засобів – будуть пріоритетними напрямками державної політики на етапі вступу України до Європейського Союзу. Невід’ємною частиною інтеграційного процесу України є впровадження чинних стандартів ЄС або їхня повна гармонізація з національним законодавством [1]. Поряд із цим, в Україні на даний час ринок насичений значною кількістю вогнегасних засобів, які реалізуються споживачам без проходження обов’язкових випробувань та процедур оцінки відповідності, але позиціонуються на ринку саме як ефективні вогнегасні засоби. Вогнегасна ефективність та якість таких виробів як правило нічим не підтверджена, а результати випробувань якщо вони є, то містять подеколи спірну інформацію зважаючи на відсутність відповідних стандартів та методик [2]. Всі вогнегасні речовини мають відповідні, фізико-хімічні властивості, які забезпечують власне механізм гасіння, а відповідно і спектр використання. При цьому ефективність вогнегасної речовини визначають такі напрями дії на полум’я, як охолодження, інгібування, ізолювання, розбавлення, або їх комбінована дія [3]. Тож систематизація, стандартизація, організація випробувань, сертифікація та використання вогнегасних систем та засобів за встановленими категоріями, в основу яких покладено експериментальні дослідження показників якості продукції за розробленими методиками в умовах інтеграції держави в європейську спільноту, в реаліях світової економічної кризи

пов'язаної з викликами – пандемія КОВІД-19, повномасштабне військове вторгнення росії, є особливо актуальним. На противагу цьому у країнах ЄС є значна кількість нормативно правових актів (НПА), що регламентують виробництво, обіг, зберігання та використання різнотипних вогнегасних засобів [2, 4].

Окремо необхідно зазначити, що зокрема за статистикою в Україні внаслідок пожеж щорічно гине понад тисячу людей. Так за 2023 рік загинуло: 1 472 людини, з них 40 дітей. Основні причини це необережне поводження з вогнем, порушення правил експлуатації електроустановок, вибухи внаслідок бойових дій — 8,9% пожеж [5]. Серед головних причин – несвоєчасне надання допомоги пожежними підрозділами і недотримання вимог пожежної безпеки на об'єктах. Катастрофічний ефект пожежних інцидентів, таких як загибель людей, пошкодження будівельних конструкцій та економічні втрати, підкреслює необхідність ефективної пожежної безпеки в будівлях [6]. Ефективність реагування на надзвичайні ситуації відіграє вирішальну роль як у процесах пожежогасіння, так і під час операцій із порятунку персоналу, де критичними чинниками виступають час прибуття та швидкість розгортання сил і засобів [7]. Водночас вагома частка деструктивних наслідків та масштабів поширення пожеж безпосередньо корелює з використанням неякісного технічного обладнання, а також із невідповідністю умов експлуатації систем пожежної сигналізації та автоматичного гасіння сучасним нормативним вимогам. Системи пожежної сигналізації характеризуються низкою технічних недоліків, серед яких: низька точність ідентифікації осередків горіння на ранніх стадіях (малих вогневих цілей), висока ймовірність хибнонегативних спрацьовувань, неоптимальна продуктивність функціонування в режимі реального часу, а також обмеженість інформаційного забезпечення щодо динаміки розвитку небезпечних чинників пожежі [8]. Практичний досвід ліквідації надзвичайних ситуацій свідчить про високі ризики повторного спалаху внаслідок тривалого прихованого горіння, а також виникнення пожеж у зонах із обмеженою візуальною доступністю. Зазначені чинники зумовили необхідність розроблення

та впровадження систем об'ємного пожежогасіння, адаптованих для застосування у складних просторових та технологічних умовах, зокрема в кабельних тунелях та на об'єктах із літій-іонними акумуляторами [9]. Також необхідно зазначити, що в існуючих умовах система Державної служби з надзвичайних ситуацій не здатна в повному обсязі виконувати покладені на неї обов'язки у сфері цивільного захисту, а відсутність свідомого ставлення громадян часто призводять до фатальних наслідків.

Таблиця 1.1 - Наслідки пожеж в Україні, статистичні показники (2021–2025) [5]

Показник (кількість в од.)	2021 рік	2022 рік (початок війни)	2023 рік	2024 рік	2025 рік
Загальна кількість пожеж	~37 000	~44 000	~ 67 934	105 214	99 298
Загиблих	1 518	1 650	1 472	1 520	1 725
Загиблих дітей	45	52	40	~35	~50
Травмованих	~1 200	~1 350	~1 100	~ 1 550	~1 800
Пожежі в житловому секторі	~30 000	~35 000	~29 000	~ 34 000	~31 024
Пожежі, спричинені війною	—	~3 800	~3 300	~7 200	~8412
Пожежі на відкритих територіях	~2 500	~3 200	~2 800	~ 62 000	~55 315
Пожежі транспортних засобів	~1 100	~1 400	~1 300	~2 900	~2 720
Орієнтовні матеріальні збитки	>1,2 млрд грн	>2,5 млрд грн	>1,8 млрд грн	> 4,5 млрд грн	~5,2 млрд грн

Державна система стандартизації та сертифікації має обмежені можливості щодо забезпечення ефективного та дієвого реагування для подолання негативних наслідків економічної кризи, масштабних надзвичайних ситуацій та руйнації спричинених війною, тому доцільним є вдосконалення нормативно технічної

бази, а також збільшення кількості організацій, що власне здійснюють сертифікаційні випробування та сертифікацію [2].

Таблиця 1.2 - Основні НПА щодо засобів пожежогасіння в Україні [10-13,27,32,43]

Назва документа	Сфера регулювання	Статус / Примітки
Кодекс цивільного захисту України	Регулює відносини у сфері захисту населення, територій, довкілля та майна від надзвичайних ситуацій	Визначає, що держава здійснює ринковий нагляд за протипожежними засобами.
НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні» (затверджені Наказом МВС №1417 від 30.12.2014)	Експлуатація, розміщення та технічний облік	Обов'язкові вимоги до зберігання, маркування, утримання засобів пожежогасіння
ДСТУ 8828:2019 «Пожежна безпека. Загальні положення»	Загально-технічні вимоги та класифікація пожеж	Визначає базові вимоги до протипожежного захисту, класифікацію пожеж та принципи вибору вогнегасних речовин.
ДСТУ EN 3-7:2016 «Портативні вогнегасники»	Технічні характеристики, сертифікація, випробування	Головний національний стандарт, повністю гармонізований із європейськими нормами (EN 3). Визначає правила сертифікації вогнегасників.
ДБН В.2.5-56:2014 «Системи протипожежного захисту»	Проектування, застосування	Визначає вимоги до застосування сертифікованих засобів пожежогасіння у будівлях
Постанова Кабінету Міністрів України № 535 від 26.05.2023 «Про затвердження Технічного регламенту засобів цивільного захисту»	Введення в обіг, сертифікація та оцінка відповідності	Регулює обов'язкову сертифікацію та маркування знаком відповідності вогнегасників, вогнегасних речовин та пожежного інвентарю.

Постанова КМУ №95 від 13.01.2016	Оцінка відповідності, сертифікація	Визначає процедури сертифікації пожежної продукції в Україні
ISO 9001:2015 (для виробників)	Система управління якістю	Не обов'язковий, але рекомендований для серійної сертифікації

Стандартизація, як діяльність, охоплює комплекс взаємопов'язаних подій, фактів у житті суспільства, які впливають на процес узагальнення та розробку нових нормативних документів і забезпечує їх використання в сферах діяльності. Стандартизація, сприяє швидкому впровадженню наукових досягнень у практику, допомагає визначити найбільш економічні та перспективні напрямки розвитку науково-технічного прогресу для виготовлення протипожежних засобів [14], сприяє переформатуванню радянської стандартизації на європейські EN, ISO.

Зростає роль стандартизації, як важливої ланки у системі управління технічним рівнем якості продукції – від наукових розробок до експлуатації та утилізації виробів. Сьогодні немає такої сфери діяльності людини, з якою б не була пов'язана стандартизація, тому що з поширенням і поглибленням пізнання, розвитком науки і техніки, удосконаленням виробництва масштаби робіт значно зростають і розширюється сфера використання принципів стандартизації [14].

Автори [15, 16, 17] вказують, що головним завданням стандартизації є створення системи нормативної документації, яка визначає прогресивні вимоги до продукції, в тому числі протипожежного призначення, її розробки, вироблення та застосування. Останнім часом однією з ключових проблем науково-технічного та економічного розвитку країн є проблема відповідності продукції вимогам нормативних документів. Поліпшення якості та ефективності продукції, зокрема протипожежного призначення (процесів, робіт та послуг) – це не тільки споживча чи технічна, а й економічна, соціальна і політична проблеми суспільства.

Необхідно відмітити, що у 1993 р. Україна вступила до Міжнародної організації зі стандартизації (ISO), Міжнародну електротехнічну комісію (IEC),

Організацію державних метрологічних закладів країн Центральної та Східної Європи (КООМТ) [16, 17]. З 1997 р. Україна стала членом Міжнародної організації законодавчої метрології (МОЗМ) [16, 17]. Це значно підвищило авторитет України на міжнародному рівні. Обраний напрямок технічної політики України визнали міжнародні організації та держави світу, про що свідчать укладені договори та угоди про співпрацю в галузі стандартизації, метрології та сертифікації з провідними державами світу.

Сучасний рівень розвитку економіки України не задовольняє матеріальних і соціальних потреб, тому на перший план виходить проблема збільшення випуску продукції, і підвищення її якості на основі стандартизації та сертифікації, та можливості зменшення витрат шляхом вдосконалення методик сертифікаційних випробувань у сфері пожежної безпеки та адаптації європейського досвіду, що полягає у спрощенні процедури проходження сертифікації за рахунок об'єднання схожих етапів випробування, без втрати якості сертифікації [14, 15].

Слід зазначити, що у 2014 році Верховною Радою України було прийнято Закон України «Про стандартизацію» (Відомості Верховної Ради (ВВР), 2014, № 31, ст.1058) [18], який є чинним на даний час. Цей Закон установлює правові та організаційні засади стандартизації в Україні і спрямований на забезпечення формування та реалізації державної політики у відповідній сфері.

Також, прийнятий у 2014 році Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» (Відомості Верховної Ради (ВВР), 2014, № 30, ст.1008) [19], регулює відносини, що виникають в процесі провадження метрологічної діяльності.

Робота в галузі стандартизації, метрології і сертифікації регламентується також Законом України від 15.01.2015 №124-19 «Про технічні регламенти та оцінку відповідності» [20], який визначає правові та організаційні засади розроблення, прийняття та застосування технічних регламентів і передбачених ними процедур оцінки відповідності, а також здійснення добровільної оцінки відповідності та Законом України «Про акредитацію органів з оцінки

відповідності» (ВВР), 2001, № 32, ст. 170), із змінами № 720-IX від 17.06.2020, ВВР, 2020, № 47, ст.408 [21].

Слід зазначити, що постановою Кабінету Міністрів України № 1057 від 16.12.2015 року «Про визначення сфер діяльності, в яких центральні органи виконавчої влади та Служба безпеки України здійснюють функції технічного регулювання» із подальшими змінами, для Державної служби України з надзвичайних ситуацій було розширено сферу технічного регулювання, зокрема в таких сферах діяльності, як: цивільний захист, техногенна і пожежна безпека, гідрометеорологічна діяльність (у тому числі засоби протипожежного захисту; засоби цивільного захисту (крім виробів медичного призначення та лікарських засобів); пожежобезпечність продукції (крім видів продукції, які включені до сфер діяльності, в яких функції технічного регулювання здійснюються іншими центральними органами виконавчої влади, і стосовно яких встановлені вимоги щодо пожежобезпечності [22].

В Україні, серед ухвалених нормативно-правових актів, у сфері технічного регулювання, 24 технічні регламенти стосуються засобів цивільного та протипожежного захисту, а також продукції з підвищеним техногенним і пожежним ризиком. Важливим є те, що окремого технічного регламенту щодо засобів цивільного й протипожежного захисту в ЄС та Україні не прийнято [23].

У зв'язку з цим, оцінка відповідності певних видів зазначеної продукції, зокрема пожежного обладнання, засобів рятування з висоти і на воді, систем протипожежного захисту - система протипожежного захисту складається з відповідних електричних пристроїв, обладнання та систем, що використовуються для виявлення пожежі, активації сигналізації та гасіння пожежі [24], систем сигналізації про горючі й токсичні гази - які виявляють вогонь протягом часу відгуку менше 16 с і підтримують стабільну, ефективну сигналізацію навіть при екстремальних температурах або під час активних пожеж [25], систем оповіщення про надзвичайні ситуації - призначені для швидкого виявлення, класифікації та поширення сповіщень під час критичних інцидентів. Деякі досягали такої послідовності, як послідовна затримка

оповіщення нижче 450 мс, точність виявлення перевищує 95% та масштабованість, що підтримує понад 12 000 одночасних пристроїв [26], та систем захисту від блискавки, здійснюється у законодавчо нерегульованій сфері. Технічні регламенти на зазначену продукцію впроваджуються без погодження з Державною службою України з надзвичайних ситуацій, а органи оцінки відповідності такої продукції призначаються без погодження з цим центральним органом виконавчої влади [23].

Крім цього, ринковий нагляд такої продукції здійснюється без участі ДСНС [27]. На сьогодні ДСНС відповідає усім критеріям європейського законодавства, що висувуються до органів ринкового нагляду, а саме: за наявності у своєму складі висококваліфікованих фахівців з питань цивільного захисту, техногенної та пожежної безпеки, вищих навчальних закладів, які проводять аварійний порятунок та інші термінові роботи у зонах надзвичайних ситуацій, для формування яких використовують віртуальні симулятори, науково-дослідних установ, що виконують і узагальнюють результати наукових досліджень у зазначених сферах, територіальних органів державного нагляду й дослідно-випробувальних лабораторій, які можуть забезпечувати здійснення державного ринкового нагляду зазначеної продукції на всій території України, а також ведення статистики надзвичайних ситуацій та пожеж, травматизму особового складу і нещасних випадків невиробничого характеру, зокрема пов'язаних із користуванням продукції [23].

Виходячи з цього, цілий ряд стандартів несе стримуючу функцію щодо розвитку та впровадження нових технологій гасіння та попередження пожеж в Україні, у галузі традиційної інтелектуальної технології протипожежного захисту точне позиціонування джерела вогню ніколи не було досягнуто. Після ідентифікації полум'я, більше дослідницьких робіт застосовують його до попередження та прогнозування поширення полум'я. Подальших досліджень технології позиціонування просторового положення джерела вогню немає [28], але поряд з цим значна кількість не ідентифікованої продукції протипожежного призначення присутня на ринку нашої держави.

Аналізуючи, окреслене питання, необхідно зазначити, що в Україні на даний час ринок насичений значною кількістю вогнегасних засобів які не підлягають обов'язковим випробуванням та відповідно сертифікації, але продаються на ринку споживачам як вогнегасні засоби. Вогнегасна ефективність та якість таких виробів як правило нічим не підтверджена, а результати випробувань якщо вони є, то містять подеколи спірну інформацію зважаючи на відсутність відповідних стандартів та методик [2, 3]. Причини цього ми вбачаємо в постійному погіршенні економічних та організаційних умов для профілактики та гасіння пожеж, а також в постійному ускладненні ситуації в зв'язку з застарілим аварійно-рятувальним обладнанням, яке потребує заміни. При цьому кількість вогнегасних засобів які не підпадають під державні стандарти постійно зростає.

Враховуючи, практичну відсутність закордонного досвіду з вирішення даної проблеми, щодо ідентифікації та порівняння вогнегасних засобів та систем, особливої актуальності набуває розроблення методичних основ, щодо визначення технічних та експлуатаційних характеристик як основних критеріїв ідентифікації вогнегасних засобів.

Вирішення проблеми полягає у створенні єдиного базового підходу та методики випробувань спільних параметрів – наприклад вогнегасної ефективності, були проведені дослідження ефективність різних звичайних ручних вогнегасників при пожежах та побудовану експериментальну платформу для гасіння пожежі [29], впроваджуючи, поряд із цим, нові вимоги європейських нормативів на виробництвах продукції протипожежного призначення, враховуючи особливості актуального стану галузі.

Таблиця 1.3 – Порівняння нормативних документів України та ЄС у сфері пожежної безпеки [10-13, 27, 62, 65, 66, 76].

Сфера	Україна	Європейський Союз
Загальний рамковий акт	Кодекс цивільного захисту України	Regulation (EU) No 305/2011 (CPR) — Construction Products Regulation

Основні вимоги до пожежної безпеки	НАПБ А.01.001-2014 — Правила пожежної безпеки	EN 13501 — Класифікація реакції на вогонь
Системи пожежної сигналізації	Вимоги в НАПБ, ДСТУ Б В.2.5-76:2014	EN 54 (серія) — Сигналізація, сповіщувачі, сирени
Переносні вогнегасники	ДСТУ 3734:2005, ДСТУ EN 3-7:2016	EN 3-7:2004+A1:2007 — Технічні вимоги, випробування
Спринклерні системи	ДСТУ Б В.2.5-185:2009	EN 12845:2015 — Проектування, монтаж, обслуговування
Газові системи пожежогасіння	ДСТУ ISO 14520-1:2009, ДСТУ EN 15004-1:2014	EN 15004 (серія), ISO 14520 — Інертні та хімічні агенти
Управління димом та теплом	ДСТУ EN 12101 (серія) — частково імплементовано	EN 12101 (серія) — Вентиляція, евакуація
Сертифікація продукції	Внутрішні процедури ДСНС, декларація відповідності	СЕ-маркування згідно CPR, технічні оцінки (ЕТА)
Оцінка ризиків та перевірки	Постанова КМУ №306 — Оцінка ступеня ризику	Risk-based approach у рамках національних програм країн ЄС
Реагування на надзвичайні ситуації	Кодекс цивільного захисту, ДСНС	Decision No 1313/2013/EU — EU Civil Protection Mechanism

Таким чином, можна стверджувати, що зазначена проблема є актуальною через відсутність нормативних документів та випробувальних методик, які б окреслювали вимоги та визначали технічні та експлуатаційні характеристики зазначених виробів відповідно до їх складу, ефективності, та ін. Встановлено, що лише ухвалення відповідних нормативних документів не вирішить усіх проблем технічного регулювання у сфері пожежної безпеки, та при виробництвах продукції протипожежного призначення, адже ці проблеми пов'язані з неналежною адаптацією національних технічних регламентів до актів ЄС, а також відсутністю належного фінансування робіт з розроблення національних стандартів під відповідні технічні регламенти та методики, і недостатнім

оснащенням, сучасним випробувальним устаткуванням, випробувальних лабораторій.

1.2. Порівняльний аналіз українських і міжнародних нормативів

Українські стандарти (ДСТУ, НПАОП) мають національну дію, тоді як міжнародні системи ISO, EN та NFPA поширюються глобально або регіонально (ЄС, США). Щодо обов'язковості, то українські стандарти є частково обов'язковими залежно від сфери застосування, ISO здебільшого мають добровільний характер, EN є обов'язковими для країн ЄС, а NFPA — обов'язкові у США.

Розробка українських нормативів здійснюється УкрНДНЦ та ДСНС, тоді як ISO формуються національними комітетами, EN — європейськими організаціями CEN, CENELEC, ETSI, а NFPA — експертними групами у США. У сфері гармонізації українські стандарти лише частково узгоджені з ISO та EN, тоді як міжнародні ISO та EN є взаємно гармонізованими, а NFPA залишаються окремою системою. Сфера охоплення українських стандартів охоплює техніку, будівництво та охорону праці, тоді як ISO та EN поширюються на всі галузі, а NFPA спеціалізуються на пожежній безпеці. Мовна політика також різниться: українські стандарти видаються українською мовою, ISO та EN — багатомовні. ISO — International Organization for Standardization є глобальною системою добровільних стандартів, гармонізованих із національними. В Україні вони впроваджуються як ДСТУ ISO. Основні сфери охоплення: якість, безпека, екологія, інформаційні технології, медицина. Прикладами гармонізації з ISO є ДСТУ ISO 9001:2015 — системи управління якістю, ДСТУ ISO 7396-1:2016 — медичні газові системи, ДСТУ ISO 7010:2006 — графічні символи безпеки.

EN — Європейські стандарти, що розробляються організаціями CEN, CENELEC та ETSI. Вони є обов'язковими для країн ЄС і впроваджуються в Україні як ДСТУ EN. Прикладами гармонізації з EN є ДСТУ EN 3-7:2016 — переносні вогнегасники [13], ДСТУ EN 54-2:2017 — пожежна сигналізація, ДСТУ EN 12845:2014 — спринклерні системи. NFPA — National Fire Protection

Association, це стандарти США у сфері пожежної безпеки. Вони є обов'язковими на території США, але також застосовуються в Латинській Америці та Європі. Їх особливістю є постійне оновлення на основі практики та аналізу інцидентів. Прикладами гармонізації є NFPA 13 — спринклерні системи, NFPA 72 — пожежна сигналізація, NFPA 99 — медичні гази. Відмінностями NFPA від EN/ISO є те, що NFPA більш гнучкі, адаптовані до складних об'єктів і часто враховують ризики, які не охоплені європейськими стандартами. Україна поступово переходить від ГОСТ до ДСТУ ISO/EN, впроваджуючи міжнародні норми у будівництво, медицину та охорону праці. Законодавчу основу складають Закон України «Про стандартизацію» та Постанова КМУ № 56 щодо адаптації технічних регламентів до вимог ЄС [18, 23]. Стратегія гармонізації передбачає інтеграцію міжнародних стандартів у національну систему, що забезпечує відповідність європейським вимогам та підвищує рівень безпеки й якості.

Таблиця 1.4 - Порівняння українських та міжнародних стандартів за галузями

Галузь	Українські стандарти	Міжнародні аналоги
Пожежна безпека	ДБН В.2.5-56, ДСТУ EN 54	NFPA 13, NFPA 72, EN 12845
Медичні гази	ДСТУ ISO 7396-1	ISO 7396-1, NFPA 99
Будівництво	ДБН, ДСТУ Б	EN 1990–1999 (Eurocodes), ISO 21930
Електробезпека	НПАОП, ДСТУ ІЕС	ІЕС 60364, NFPA 70 (NEC)
Охорона праці	НПАОП	ISO 45001, OSHA

Отож, українська нормативна база поступово інтегрується у міжнародний простір, але ще зберігає власні особливості, а національна система стандартів перебуває у процесі активної гармонізації з міжнародними стандартами ISO та EN, що особливо помітно в галузях пожежної безпеки, медицини, будівництва, електробезпеки та охорони праці. Такий підхід дозволяє забезпечити

відповідність європейським вимогам, підвищити рівень безпеки та якості захисту населення і працівників, а також інтегрувати українські підприємства у світовий ринок. Водночас стандарти NFPA залишаються потужною альтернативою для складних промислових об'єктів, де потрібна гнучкість та врахування специфічних ризиків, які не завжди охоплюються європейськими чи міжнародними нормами.

Для керівників підприємств важливо не лише знати міжнародні аналоги українських стандартів, але й інтегрувати їх у внутрішні процедури та політики. Це дозволяє забезпечити відповідність вимогам контролюючих органів, підвищити конкурентоспроможність та знизити ризики у сфері охорони праці, пожежної та електробезпеки. При виборі стандарту слід враховувати специфіку об'єкта: для медичних закладів пріоритетними є стандарти ISO у сфері медичних газів та якості, для будівельних компаній — Eurocodes та ДСТУ EN, а для промислових підприємств із підвищеним рівнем ризику — NFPA.

Таким чином, стратегія розвитку нормативної бази в Україні має ґрунтуватися на комплексному підході: гармонізації з міжнародними системами, адаптації до національних умов та практичному впровадженні у внутрішні регламенти підприємств. Це забезпечить не лише формальну відповідність законодавству, але й реальне підвищення рівня безпеки, ефективності та довіри з боку партнерів і споживачів.

1.3 Аналіз поняття та класифікації вогнегасних систем і засобів

Пожежна безпека є критично важливою складовою техногенної та екологічної безпеки об'єктів та будинків, тому ці об'єкти та будинки повинні бути спроектовані з усіма вогнегасними системами таким чином, щоб легко справлятися з такими надзвичайними ситуаціями та уникати будь-яких несприятливих пожеж [30]. Вогнегасні системи та засоби — це не лише технічні рішення, а й елемент правового, організаційного та наукового підходу до захисту

життя, майна та довкілля. У даному розділі розглянуто поняття, класифікацію, принципи дії, типи та особливості застосування вогнегасних систем і засобів.

Вогнегасні системи і засоби — це сукупність технічних рішень, речовин і пристроїв, призначених для виявлення, локалізації та ліквідації пожежі. Виявлення пожежі - одне з ключових понять у гасінні пожежі. У світі існує чимало систем та звичайні системи виявлення пожежі зазвичай використовують датчики навколишнього середовища, такі як детектори диму, температури та частинок. Ці датчики є економічно ефективними і відносно простими у розгортанні, особливо в обмеженому приміщенні [31]. Також важливими системи є системи пожежної сигналізації. Найбільшу корисність забезпечує система управління димом, однак вона має найнижчу надійність. Система аварійного сповіщення, що має найнижчу корисність, має високу надійність [32]. Вони є ключовими елементами системи протипожежного захисту будь-якого об'єкта. Зокрема вогнегасні системи — це комплекси технічних засобів, що забезпечують автоматичне або ручне виявлення, локалізацію та ліквідацію пожежі. До прикладу системи пожежогасіння на водній основі вже давно використовуються для протипожежного захисту в різних районах, наприклад, для захисту будівель, тунелів та кораблів. Відповідно, щоб забезпечити наукову основу для проектування систем придушення води, були проведені великі дослідження для вивчення механізмів цих систем для зменшення розміру пожежі, охолодження навколишнього середовища та захисту бажаних конструкцій [33]. Тобто це інженерні комплекси, які автоматично або вручну активуються для гасіння пожежі. Вони включають у себе наступні системи. Системи водяного пожежогасіння, це - спринклерні, дренчерні установки, досліджено що миттєвий, так і безперервний охолоджуючий ефект водяного туману є найкращими для гасіння літій-іонних акумуляторів [34]. Газові системи, які використовують інертні або хімічно активні гази (наприклад, хладони, CO₂), виявлено що використовуючи газові системи пожежогасіння на складах з різною продукцією рівень успіху систем пожежогасіння вуглекислим газом та азотом становив 100% [35]. Пінні установки, що генерують хімічну або повітряно-

механічну піну. Галузевим стандартом була піна для формування водної плівки (AFFF) для боротьби з пожежами та небезпеками рідкого палива протягом майже 50 років. AFFF - це розчин на водній основі, який містить фторовану, плівкоутворювальну поверхнево-активну речовину для герметизації поверхні палива під час придушення/гасіння [36]. Порошкові системи, які застосовують вогнегасні порошки для ізоляції та хімічного гальмування горіння, нещодавно були розроблені нові чисті мікронні порошкові частинки на водній основі (DW), які були отримані методом фізичної дисперсії гідрофобного кремнезему та ультрачистої води в різних пропорціях. Матеріал DW може миттєво загасити пожежу в невеликому нафтовому басейні. DW показує найкращу ефективність гасіння в порівнянні з сухим порошком [37]. Аерозольні системи — це системи, які створюють тонкодисперсні суміші, що пригнічують полум'я; також у них можуть додавати нанокompозит в аерозольно-формульований композит для швидшого пожежогасіння [38]. Питання порівняння вогнегасних речовин та чинників впливу на швидкість горіння сполук, з яких утворюються вогнегасні аерозолі, висвітлено у працях здобувача [39, 40].

Основні функції для вибору систем та засобів пожежогасіння полягають у виявленні загоряння, ініціація гасіння, локалізації джерела запалювання та запобігання повторному загорянню.

Поряд із цим, для моделювання пожежі, її ліквідацію та локалізацію різними вогнегасними засобами використовують нейромережі, які відображають усе як у реальному часі та показують найбільш небезпечні зони горіння [41]. У важкодоступних місцях у тунелях, де зазвичай використовують засоби об'ємного гасіння, створюють документи для вивчення таких пожеж у яких, моделюється просторовий та часовий розподіл температури вогню в структурі тунелю, спрощена модель відколювання, враховуючи час ініціації, швидкість відколювання та час завершення [42].

Слід зазначити, що вогнегасні засоби — це речовини або пристрої, які безпосередньо впливають на процес горіння, припиняючи його фізико-хімічним шляхом. До прикладу протестовано, що інгібітори можуть щоб запобігти

займанню метану, ініційованому іскрою, придушити поширення полум'я та запобігти його переходу до вибуху. Тобто це речовини або пристрої, які безпосередньо використовуються для гасіння або придушення вогню [39, 40].

Гасіння пожежі базується на порушенні одного або кількох елементів «тетраедра горіння»: тепло, кисень, горюча речовина, хімічна реакція.

Таблиця 1.5 – Класифікація вогнегасних засобів за принципом дії.

Принцип дії	Засоби гасіння	Механізм впливу
Охолодження	Вода, тонкорозпилена вода	Зниження температури нижче температури займання
Ізоляція	Піни, пісок, покривала	Блокування доступу кисню
Розбавлення	CO ₂ , азот, водяна пара	Зменшення концентрації кисню
Інгібування	Хладони, порошки	Хімічне гальмування реакції горіння

Характеризуючи механізм впливу вогнегасних засобів за принципом дії слід зазначити наступне. Щодо охолодження, нещодавно були проведені великі дослідження щодо гасіння пожеж водяним туманом. Вчені провели велике випробування фіксованої системи пожежогасіння на водній основі в тунелі Рунехамар і виявили, що швидкість тепловиділення вогню під час випробування пожежогасіння була знижена до меншої порівняно з вогневими випробуваннями з вільним згорянням [44]. Щодо ізоляції пожежі піною, гасіння пожежі піною має значні значення застосування в промисловому виробництві, що охоплюють різні технічні галузі, включаючи хімічні процеси, харчову переробку, розділення мінералів, видобуток нафти та запобігання та боротьбу з пожежами. Як основний компонент пінних систем, поверхнево-активні речовини можна класифікувати на три основні категорії на основі молекулярної структури, які є на основі вуглеводнів, на основі фторвуглецю та на основі силікону. У технології пожежогасіння водна плівкоутворююча піна (AFFF) демонструє значну ефективність у гасінні пожеж класу В. Однак AFFF містить пер- та поліфторалкільні речовини (PFAS), які, як було доведено, демонструють потенціал біоаккумуляції та екологічну токсичність [36]. Щодо придушення

пожежі за рахунок розбавлення кисню, хоча інертні гази схильні до дифузії з витоком повітря і не можуть залишатися в районі, де вони потрібні, але впорскування інертного газу в герметичну зону вогню є одним з найефективніших засобів, що використовуються для боротьби з катастрофою шляхом розбавлення кисню [45]. Щодо гасіння пожежі порошками, їх використовують у гальмуванні горіння та вибуху водню. Завдяки чудовій плинності ультратонких сухих порошоків, він може швидко розсіятися і покривати зону згорання, утворюючи рівномірний бар'єр пожежогасіння, який блокує горіння та поширення водню. Крім того, частинки сухого порошку мали більшу питому площу поверхні, що дозволяло їм швидко адсорбувати активні радикали в ланцюговій реакції згорання і ефективно переривати процес дефлаграції [46].

Класифікація за типом вогнегасника наведена у таблицях поданих нижче.

Таблиця 1.6 - Класифікація вогнегасника за типом вогнегасної речовини.

Тип	Характеристика / Сфера застосування
Водяні	Ефективні для пожеж класу А (тверді речовини)
Пінні	Для пожеж класів А і В (тверді речовини, рідини)
Вуглекислотні	Для пожеж класу В, С (рідини, горючі гази)
Порошкові	Універсальні, охоплюють класи А, В, С
Аерозольні	Для локального гасіння в закритих об'ємах

Отже, вибір конкретного типу вогнегасника визначається фізико-хімічними властивостями горючих речовин та специфікою експлуатації об'єкта, що потребує індивідуального підходу до комплектації засобів захисту для гарантування ефективної локалізації пожежі на ранній стадії.

Таблиця 1.7 - Класифікація вогнегасника за конструкцією.

Тип	Характеристика / Сфера застосування
------------	--

Переносні	До 12 кг, для оперативного реагування
Пересувні	До 150 кг, для гасіння на великих площах
Стаціонарні	Інтегровані в систему об'єкта

Класифікація вогнегасників за конструкцією дозволяє оптимізувати оснащення об'єкта залежно від його масштабів та необхідної швидкості реагування, забезпечуючи перехід від мобільних засобів ручного керування до потужних пересувних одиниць або інтегрованих рішень.

Таблиця 1.8 - Класифікація вогнегасних систем за способом запуску.

Тип системи	Опис
Автоматичні	Спрацьовують без участі людини
Напівавтоматичні	Вимагають ручного запуску
Ручні	Вогнегасники, пожежні крани

Розподіл систем за способом запуску визначає рівень автономності протипожежного захисту об'єкта, де автоматизація процесу є пріоритетною для захисту об'єктів без постійної присутності персоналу, тоді як ручні засоби залишаються критично важливим інструментом оперативного втручання. Новітні автоматичні вогнегасники спрацьовують коли починається пожежа, вони передають раннє попередження і допомагають мінімізувати шкоду. Контролер підключений до виходів датчика температури та детектора диму, які складають цю систему. Завдяки врахуванню системою щільності диму ймовірність помилкових тривог може бути зменшена. У цьому випадку мікроконтролер використовується для управління всією установкою, а результати тестування апаратного прототипу демонструють життєздатність запропонованої стратегії, яка відповідає вимогам дизайну та підвищує надійність системи [47]. Закордоном у програмах “розумне місто” створюють програму для моніторингу вогнегасників. Запропонований додаток “IoT” буде постійно записувати

значення тиску в режимі реального часу з датчиків, які, як передбачається, прикріплені до вогнегасника (які є невід'ємною частиною вогнегасника) і зберігатиме їх у локальній/хмарній базі даних. Він також включатиме систему сповіщень, яка повідомить користувача, як тільки буде записано значення тиску, яке знаходиться поза діапазоном [48].

Таблиця 1.9 - Комплексна класифікація систем за типом середовища та класами пожеж.

Тип середовища	Клас пожежі / Тип речовини	Рекомендовані технічні рішення
Водяні	A (Тверді речовини)	Спринклерні та дренчерні установки, тонкорозпилена вода
Пінні	A, B (Тверді речовини, горючі рідини)	Установки хімічної та повітряно-механічної піни
Газові	B, C (Рідини, гази)	Системи з вуглекислим газом (CO ₂), інертними газами, хладонами
Порошкові	A, B, C, D (Універсальні / Метали)	Системи з розпиленням універсальних або спеціальних (клас D) порошоків
Аерозольні	A, B (Об'ємне гасіння в закритих просторах)	Генератори вогнегасного аерозолю
Спеціальні	F (Жири, кухонні пожежі)	Модульні системи зі специфічними складами (К-клас)

Різноманітність вогнегасних систем за типом середовища дозволяє підібрати оптимальний спосіб ліквідації пожежі, виходячи з мінімізації побічних збитків для майна та забезпечення максимальної швидкості пригнічення вогню в конкретних експлуатаційних умовах. Представлена класифікація демонструє взаємозалежність між фізичною природою вогнегасної речовини та категорією пожежної небезпеки, що є основою для проєктування систем, здатних не лише ефективно ліквідувати осередки горіння, а й запобігти вторинним пошкодженням матеріальних цінностей.

Зокрема закордоном у високо поверхових будинках для гасіння пожеж на початкових стадіях можуть використовувати системи пожежогасіння на водній

основі. Серед найбільш широко використовуваних методів гасіння води - спринклерні та водяні туманні системи, які особливо ефективні у запобіганні поширенню вогню та диму в багатоповерхових будівлях. Ці комплексні заходи є життєво важливими для підвищення пожежної безпеки та пом'якшення ризиків, пов'язаних з димом та токсичними газами у висотних будівлях, забезпечуючи безпеку мешканців під час надзвичайних ситуацій [49].

Вогнегасники на водній основі мають чудовий охолоджуючий ефект і можуть швидко знизити температуру джерела вогню. Пінні вогнегасники, навпаки, покривають поверхню джерела вогню, щоб ізолювати кисень і тим самим запобігти продовженню горіння. Порошкові вогнегасники гасять пожежі за допомогою хімічного придушення, а їх застосування досить великий. Газові вогнегасники - це ефективне вогнегасне середовище, що охоплює одну або кілька сумішей газоподібних речовин, здатних гасити полум'я, які добре відомі своєю високою ефективністю, хорошими ізоляційними властивостями та чистим, без залишковим застосуванням. Отже, вони широко використовуються в літаках, кораблях, нафтових і газових платформах, точному обладнанні, архівах та комп'ютерних кімнатах [50].

Щодо пожеж металів характеризуються інтенсивним теплом і їх важко гасити через реактивність деяких металів з O_2 , CO_2 , N_2 , галогенними сполуками або водою. Ці пожежі можуть бути руйнівними, як це видно з вибуху в порту Тяньцзінь 2015 року та пожежі та вибуху в. Звичайні вогнегасники, такі як вода, піна, вуглекислий газ та загальний сухий порошок, неефективні проти металевих пожеж. Основними компонентами звичайних металевих вогнезахисних речовин є графіт, бікарбонат натрію та хлорид натрію. Вогнезахисний механізм бікарбонату натрію та сухого порошку карбонату натрію вогнегасників є однорідним, що свідчить про те, що спостережуваний ефект придушення солей лужних металів був в основному пов'язаний з концентрацією іонів натрію [51].

Щодо пожеж на кухні - водний спрей виявився найефективнішим, екологічно чистим та економічним способом гасіння вогню, що підтримується 2473 опублікованими статтями, що охоплюють 50 років з 1970 по 2020 рік [52].

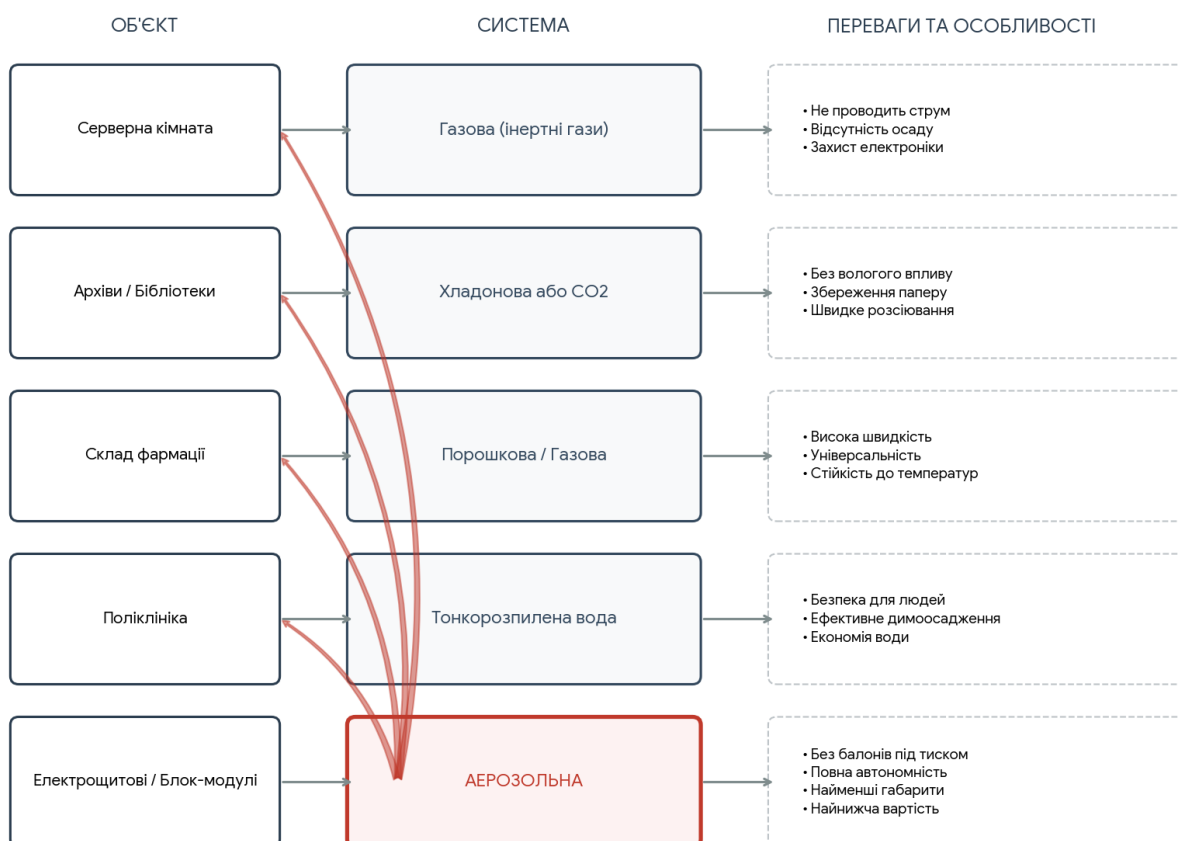
Враховуючи екологічні та санітарні аспекти, слід врахувати, що: хладони — ефективні, але мають озоноруйнівний потенціал; інертні гази — екологічно безпечні, але дорогі; порошки — залишають сліди та потребують прибирання; вода — екологічна, але може пошкодити обладнання.

Порошки для пожежогасіння з різними складами стали широко популярними для гасіння пожеж. Більшість порошоків для гасіння містять лужні хімічні елементи, такі як KHCO_3 , NaHCO_3 , K_2CO_3 , Na_2CO_3 тощо. Якщо вони приземляються на металеву поверхню, вони окислюють її, а також можуть трансформувати поверхневий шар матеріалу. Системи газового пожежогасіння не завдають такої шкоди, оскільки гази хімічно нейтральні. Ці системи засновані на інертних газах, зокрема, N_2 , Ar , CO_2 та їх сумішах. Такі гази перешкоджають подачі окислювача до джерела займання, тим самим пригнічуючи термічне розкладання матеріалу [53].

Щодо санітарних обмежень то слід зазначити, що у медичних закладах, лабораторіях — перевага надається газовим системам. Окрім цього дуже важливо під час проектуванні цих будівель забезпечити відкриті простори; вогнестійкі двері; підвищення тиску в вестибюлях ліфтів; системи вентиляції диму, протипожежних демпферів; автоматичної спринклерної системи, системи пожежної сигналізації; альтернативне джерело живлення та вивіски для легкої евакуації [30]. У харчовій промисловості — використовуються засоби без токсичних залишків, вогнегасники на основі порошку, як правило, ефективні для пожеж класу В. Тим не менш, після використання цих агентів значна кількість засобу залишається і покриває навколишню територію; це може призвести до порошкоподібного безладу та пошкодження майна та електронного обладнання, тому використовують воду з різними добавками, до прикладу добавки водяного туману для підвищення ефективності пожежогасіння. Вчені розробили добавку, що складається в основному з поверхнево-активної речовини, лимонної кислоти, бури та хлориду натрію, та було підтверджено, що додавання 0,5 об. %- астралену до водяного туману зменшило його час гасіння в чотири рази порівняно з часом чистого водяного туману [55]. Вибір системи пожежогасіння для об'єкта має

відповідати критеріям вибору за тип об'єкта (офіс, склад, медичний заклад), наявністю електрообладнання, класом пожежної небезпеки, вимогам до екологічності та вартість монтажу та обслуговування. Зазвичай використовуються 4 основних засобів пожежогасіння: вода, піна, сухий порошок, CO₂ та волога хімія. Системи вогнегасної піни містить фторохімічні поверхнево-активні речовини, які допомагають контролювати фізичні властивості води, дозволяючи їй плавати і поширюватися по поверхні вуглеводневої рідини. Сухий порошок заснований на монофосфаті амонію (сухий хімічний), тоді як вологий хімічний засіб - це розчин лужних солей під тиском. Ці засоби пожежогасіння використовуються для гальмування горіння різних горючих матеріалів під час пожежних інцидентів, включаючи тверді речовини, рідини, гази, метали та електричні пожежі.

Схема 1.1. - Приклад вибору методу боротьби з пожежею.



Для ефективного протипожежного захисту для різних об'єктів слід вибрати відповідний метод боротьби з пожежею, засоби пожежогасіння та систем пожежогасіння [56].

Так, для трансформатора, пожежа класифікується як електрична пожежа, а електрообладнання є важливою частиною пожежного навантаження в будівлях. У порівнянні зі звичайним вогнем, важче загасити електричну пожежу, оскільки для цього потрібна протипожежна гасіння як з високою ізоляційною, так і з вогнегасною ефективністю. У цьому напрямку водяний туман високого тиску (тонкорозпилена система) - це система пожежогасіння, яка працює шляхом ізоляції молекул кисню та охолодження температури. Крім того, через спринклер система може розпорошувати тонкий водяний туман під певним тиском, щоб загасити пожежу [57].

1.4. Недоліки та прогалини у чинному регулюванні випробувань в Україні

Нормативно-технічне забезпечення сфери протипожежного захисту в Україні формувалося в умовах зміни державного устрою, економічних криз, воєнних дій та стрімкого розвитку технологій у галузі пожежогасіння. Така неоднорідність історичного розвитку призвела до значної кількості структурних, процедурних та правових прогалин, що впливають на ефективність і якість вогнегасних засобів та систем. Однією з ключових проблем є фрагментарність та неузгодженість нормативної бази: у країні діє понад двісті різних документів, зокрема ДБН, ДСТУ, НПАОП, технічні регламенти, інструкції та стандарти підприємств, які часто створювалися різними органами без відповідної координації. Це призводить до дублювання вимог, суперечливості термінології, різних підходів до оцінки ефективності вогнегасних засобів і відсутності узгодженості між технічними та правовими механізмами контролю. На відміну від Європейського Союзу, де діє єдина система регулювання за CPR, українська

система є розірваною та застарілою. Значна частина чинних стандартів ґрунтується на ГОСТах 1970–1980-х років, створених під технології та матеріали, які вже не відповідають сучасним вимогам [1]. В Україні досі немає оновлених методик для випробувань сучасних засобів пожежогасіння, таких як аерозольні генератори нового покоління, системи водяного туману високого тиску, засоби гасіння пожеж літій-іонних батарей та системи гасіння у дата-центрах. Відсутність таких методик знижує достовірність сертифікаційних випробувань і створює ризик експлуатації засобів із невизначеним рівнем ефективності.

Суттєвою проблемою є також відсутність регулювання новітніх технологічних ризиків. На відміну від США, де існують спеціалізовані стандарти NFPA 855 для систем зберігання енергії, NFPA 770 для тонкорозпиленої води чи NFPA 2001 для газових систем, в Україні відсутні нормативні вимоги для гасіння Li-ion пожеж, водневої енергетики, взаємодії інтегрованих систем автоматизації та інших сучасних технологічних процесів [54]. На тлі стрімкого розвитку цих сфер така прогалина може стати критичною.

Недосконалою є й система сертифікації та ринкового нагляду. Чинні механізми оцінки відповідності охоплюють не всю продукцію, а окремого технічного регламенту для засобів пожежогасіння не існує. Ринковий нагляд функціонує без залучення ДСНС як експертного органу, що сприяє поширенню засобів, які не пройшли державних випробувань, мають сумнівні протоколи або виготовляються за неконтрольованими технічними умовами. Відсутність єдиних методик визначення вогнегасної ефективності ускладнює об'єктивне оцінювання засобів. Більшість методик орієнтовані на окремі класи пожеж і не враховують поведінку вогнегасних агентів у складних просторових умовах, тоді як міжнародна практика активно застосовує CFD-моделювання на основі FDS, PyroSim і Pathfinder. В українських нормативних документах такі підходи не передбачені.

До цього додається відсутність системного механізму регулярного перегляду стандартів. Якщо у країнах ЄС оновлення стандартів відбувається

кожні п'ять років, то в Україні багато документів не переглядалися понад два десятиліття. Це призводить до того, що стандарти не відображають нові технології, матеріали, воєнні ризики та нові типи об'єктів. Лабораторна база теж залишається недостатньо розвиненою: більшість лабораторій не володіє сучасним обладнанням, не здатна тестувати водяний туман високого тиску, газові системи високого тиску чи аерозольні системи, а також не інтегрована у міжнародні системи ІЛАС та ІАФ. Це знижує рівень довіри до української сертифікації й ускладнює експорт продукції.

Для подолання вказаних проблем необхідна гармонізація стандартів з ISO, EN та NFPA, оновлення застарілого нормативного масиву, цифровізація реєстрів, створення прозорих механізмів оцінки відповідності, запровадження гнучких механізмів оновлення нормативів та підвищення кваліфікації фахівців. Хоч нормативна база України має значний потенціал, вона потребує системної модернізації для забезпечення конкурентоспроможності та належного рівня безпеки [18, 20, 23].

1.5. Вплив нормативної бази на якість і безпеку вогнегасних засобів

Нормативно-технічна база є ключовим чинником, що визначає рівень безпеки, надійності та ефективності вогнегасних засобів на всіх етапах їхнього життєвого циклу — від проектування та виробництва до експлуатації й утилізації. На етапі проектування стандарти встановлюють вимоги до конструкцій, матеріалів, вузлів і параметрів вогнегасних речовин, визначають стійкість систем до корозії, вібрацій, температурних впливів та екологічні характеристики. Якщо такі вимоги нечіткі або застарілі, виробники отримують можливість знижувати якість матеріалів, спрощувати конструкції або застосовувати дешеві аналоги, що безпосередньо знижує ефективність гасіння.

Визначення вогнегасної ефективності є одним із найважливіших елементів оцінки якості засобів пожежогасіння. Якість вогнегасного засобу залежить від точності визначення часу гасіння, концентрації агента, рівномірності його

розподілу, впливу теплових і динамічних факторів, а також здатності системи запобігати повторному займанню. Міжнародні стандарти EN та NFPA передбачають масштабні випробування, використання CFD-моделювання, тести на повторне загоряння та оцінювання у складних реальних сценаріях. В українських нормах такі підходи практично не застосовуються, що призводить до завищення показників ефективності та недооцінки ризиків [58].

Нормативи впливають і на безпеку споживача. Вони мають регулювати допустиму токсичність продуктів розкладу, максимальні концентрації хімічних агентів, безпечні рівні тиску при розгерметизації, вимоги до вентиляції після гасіння та кваліфікаційні вимоги до персоналу. За відсутності таких норм виникають ризики отруєнь продуктами розкладу хладонів, баротравм, термічних уражень та несправності систем через некоректний монтаж [12].

На рівні експлуатації будівель нормативи забезпечують сумісність різних елементів систем пожежогасіння, правильність розрахунку кількості та потужності засобів, захист критично важливих об'єктів, таких як дата-центри, медичні установи та великі склади, а також інтеграцію систем гасіння із системами сигналізації та вентиляції [11]. За недостатньої якості нормативів виникають ситуації, коли об'єкти залишаються без належного захисту, засоби обираються неправильно або працюють неефективно у складних умовах.

З погляду ринку та конкурентоспроможності національних виробників сучасна нормативна база є стимулом для технологічного розвитку, підвищення якості продукції та виходу на міжнародні ринки. Водночас застарілі норми сприяють поширенню несертифікованих засобів, стимулюють недобросовісну конкуренцію та погіршують позиції українських виробників. Соціальний вплив нормативної бази прогалини у рівні безпеки населення: ефективні нормативи сприяють зниженню кількості жертв, економічних збитків та навантаження на служби реагування, тоді як слабка нормативна система призводить до зростання ризиків катастроф та втрат.

У міжнародному контексті Україна значно відстає за рівнем регламентування випробувань, сертифікації, маркування засобів пожежогасіння,

технічного обслуговування та визначення їхньої ефективності. Стандарти ISO, EN та NFPA містять чіткі визначення цих процесів, тоді як українська нормативна база має численні прогалини та нечіткі вимоги. Таким чином, нормативна база істотно впливає на якість та безпеку вогнегасних засобів, а її вдосконалення потребує гармонізації з міжнародними стандартами, оновлення методик випробувань, обов'язковості сертифікації та посилення контролю на всіх рівнях.

Висновки за розділом.

Сучасна нормативна база у сфері газового пожежогасіння, зокрема стандарти серії ДСТУ EN 15004 та ДСТУ 4466, характеризується вираженим акцентом на кількісних показниках, проте практично повністю ігнорує фізику динаміки потоків та умови створення однорідної концентрації в об'ємі. Чинні методики розрахунку базуються на спрощеній моделі, де приміщення розглядається як порожній геометричний простір, а процес заповнення — як миттєве досягнення гомогенності суміші. На практиці це створює серйозний розрив між проектними цифрами та реальною ефективністю гасіння. Жоден нормативний документ не встановлює критеріїв або коефіцієнтів якості змішування, хоча через різну густину вогнегасної речовини та повітря часто виникає ефект гравітаційного розшарування, коли біля підлоги утворюється надлишкова концентрація, а у верхній частині об'єму вона залишається недостатньою. Так само жорстка регламентація часу випуску речовини спрямована лише на швидкість подачі, але не враховує енергію та траєкторію струменя, що в умовах складної геометрії приміщення, наявності серверних стійок або стелажів призводить до появи «мертвих зон». У таких зонах газ є лише шляхом повільної природної дифузії, що значно перевищує критичний час гасіння. Відсутність у нормативах вимог щодо обов'язкового моделювання повітряних потоків (CFD-моделювання) або натурних вимірювань концентрації в різних точках об'єму після монтажу призводить до того, що системи

приймаються в експлуатацію на підставі формальної цілісності трубопроводів та наявності розрахункової маси газу в балонах. Таким чином, нормативне поле гарантує лише наявність достатньої кількості речовини, але повністю перекладає відповідальність за її ефективне поширення та створення стійкого вогнегасного середовища на проектувальника, не надаючи йому при цьому чітких інструментів чи критеріїв для верифікації цього процесу.

Розділ 2. Методологія та практика випробувань вогнегасних систем: проблеми та перспективи

2.1 Аналіз існуючих методик випробувань.

Випробування вогнегасних систем проводяться з метою визначення їхньої реальної ефективності під час ліквідації пожеж, а також для підтвердження відповідності вимогам міжнародних та національних стандартів. Залежно від типу системи застосовуються різні методики, що включають модельні та повномасштабні тести, визначення параметрів розподілу, ефективності та стабільності [3]. Їх випробування є критично важливим етапом їх прийняття в експлуатацію, підтвердження ефективності та відповідності нормативним вимогам [59]. Найвні методики можна умовно поділити за типами систем, характером впливу на осередок пожежі та критерії оцінювання результатів. Найважливіша проблема в Україні відсутня методика з випробування ефективності вогнегасних порошків спеціального призначення для гасіння пожеж класу D [60]. Також проведено дослідження використання водяного туману для гасіння пожеж. Дослідники провели повномасштабні експерименти та чисельне моделювання для дослідження характеристик водяного туману при гасінні пожежі. Виявлено вплив характеристик водяного туману на ефективність пожежогасіння, при цьому встановлені оптимальні умови для придушення. Однак ефективність водяного туману в середовищах високошвидкісного повітряного потоку, таких як ті, що зустрічаються в сценаріях пожеж, залишається областю активних досліджень [61]. У міжнародній практиці для вогнегасних систем найпоширенішими є стандарти, які регламентують застосування, монтаж, випробування, технічне обслуговування та сертифікацію систем пожежогасіння. Серед них — EN 15004 [66] та ISO 14520 [65] для газових систем, а також NFPA-стандарти, зокрема NFPA 2001 [67] для «чистих» газових систем [62]. До прикладу є міжнародний стандарт ISO 14520 [65] (переважно через EN 15004 [66]- європейський варіант) який охоплює системи так званого

«total flooding», у перекладі - повне затоплення або об'ємне пожежогасіння, це газове пожежогасіння, де електроізолювані гази або інертні газові суміші вивільнюються у приміщення та утворюють концентрацію, достатню для гасіння пожежі. Також міжнародний NFPA 2001 [67] визначає вимоги до «clean agent» систем (газові або хімічні агенти, які не залишають осаду), їх дизайну, монтажу, тестування, обслуговування й експлуатації [63]. Для аерозольних вогнегасних систем, які використовують конденсований аерозоль як засіб пожежогасіння наявний стандарт EN 15276-1/2 [64].

Газові вогнегасні системи (Gaseous Fire Extinguishing Systems, GFE Systems) - це установки об'ємного пожежогасіння, в яких гасильний агент подається у приміщення у вигляді газу та створює концентрацію, достатню для приглушення або повного припинення горіння. Вони використовуються там, де потрібне чисте гасіння без залишків (серверні, архіви, музеї), необхідна миттєва дія і відсутність пошкоджень обладнання, недопустиме застосування води, піни чи порошків. Випробування цих систем проводять з метою визначення концентрації, яка необхідна для гасіння, часу заповнення об'єму, рівномірності розподілу агента, поведінки системи під час реальних пожеж, ризиків повторного займання та інші [65–67]. Методикою випробувань є «Cup Burner Test» (випробування на чашковому пальнику) - це лабораторний тест для визначення мінімальної концентрації агента, що припиняє горіння певної рідини або твердого матеріалу. У невелику чашку наливають пальне (хептан, метанол, ацетон), після цього запалюють його та подають у камеру газовий агент з наростаючою концентрацією, фіксуючи момент згасання. Результатом є мінімальна вогнегасна концентрація (minimum extinguishing concentration) [65]. Також є «Full-Scale Fire Tests» (повномасштабні тести) - це найважливіший та найскладніший тип випробувань, тому що саме вони визначають, чи система реально здатна погасити пожежу. Ці тести включають у себе пожежі класів А, В через різні перешкоди, вентиляції та з підвищенням температури. Цим тестом фіксують час гасіння, стабільність подачі агента, повторне займання, швидкість зниження концентрації кисню. Ці тести визначають об'єм, який система може реально

захистити - так званий «maximum protected volume». Окремо визначають також тест приміщення для цієї системи «Enclosure Tightness Test» чи «Room Integrity Test» - цей тест визначає здатність приміщення утримувати газ певний час та чи не буде концентрація нижчою за потрібну після подачі агента. Суть досліду - у кімнаті через дверний проріз встановлюють вентилятор і манометр, після цього створюють різницю тисків, вимірюють “витоки” повітря та спеціальна програма “hold time” вимірює час протягом якого ця концентрація буде утримуватись [67].

Недоліком випробовування тесту «Cup Burner Test» (випробування на чашковому пальнику) є те, що він визначає лише мінімальну об’ємну концентрацію агента для гасіння стандартного полум’я. Тест не враховує теплове навантаження реальних пожеж та те, що для твердих матеріалів потрібні інші методики. Проблемою випробовування тесту з Room Integrity Test є те, що він визначає герметичність, але не моделює реального надлишкового тиску під час подачі газу, не враховує можливу деформацію дверей чи клапанів при реальному спрацюванні та не гарантує утримання концентрації при складній геометрії приміщення.

Аерозольні вогнегасні системи — це установки пожежогасіння, в яких вогнегасна дія досягається за рахунок тонкодисперсного аерозолу. Аерозоль містить мікродисперсні частинки калійних солей і газоподібні продукти, які діють шляхом інгібування вільних радикалів полум’я, часткового витіснення кисню та створення об’ємного заповнення, яке зупиняє тепловий ланцюг горіння. Методика випробування на ефективність гасіння (Extinguishing Test) — передбачає проведення випробувань у спеціальних камерах, що моделюють реальні пожежі. До прикладу для класу А використовуються дерев’яні стоси (wood crib test); для класу В — відкриті лотки з бензином або ізопропанолом а також тестують електрощитові моделі під напругою. Під час цього випробування визначають час заповнення камер аерозолем та рівномірність розподілу аерозолу [68]. Тест на стійкість до повторного займання (Reflash Test) — після гасіння проводиться повторне підпалювання матеріалу, щоб визначити здатність аерозолу утримувати концентрацію та можливість пригнічення тління. Це

критичний показник для приміщень із кабельними трасами та полімерними матеріалами [68, 69]. Випробуванням на об'ємне заповнення (Hold Time Test) - перевіряється, скільки часу в приміщенні зберігається ефективна концентрація аерозолі. Це випробування аналогічно до (Door Fan Test) для газових систем, але вимірюється оптична щільність повітря та контролюється концентрація частинок у різних точках [68, 70].

Недоліками цих випробувань є те, що у випробування на ефективність гасіння наявна обмежена репрезентативність реальних умов (моделі дерев'яних стосів, піддони з рідиною чи електрощитові макети не завжди точно відтворюють пожежі у складних об'ємах (серверні, кабельні канали, технічні порожнини)), також присутня сильна залежність від геометрії камери (результат може істотно змінитися при інших розмірах приміщення, вентиляції, наявності отворів), спостерігається нерівномірний розподіл аерозолі (багато систем показують хороший результат у тестовій камері, але у реальних об'ємах виникають «мертві зони»). Тест на стійкість до повторного займання не враховує всі типи матеріали (різні полімери, гуми чи силікони можуть поводитися по-іншому, ніж деревина або рідина), також тест важко інтерпретувати у контексті реальних пожеж у приміщеннях, адже продукти горіння та нагріті поверхні можуть створювати інші умови. У випробуванні на об'ємне заповнення (Hold Time Test) можливо відзначити нестабільність аерозольної концентрації на відміну від газових систем, частинки аерозолі швидко осідають і це складно стандартизувати. Важливим є відсутність єдиного міжнародного методу, подібного до Door Fan Test. Адже для газових систем є NFPA 2001 (Fan Integrity Test), а для аерозолів аналогів практично немає. Тому неможливо точно оцінити вертикальне розшарування, а у високих приміщеннях ефективна концентрація буде різною вгорі та внизу.

Порошкові системи пожежогасіння застосовують тонкодисперсний вогнегасний порошок, який може складатися з фосфатів амонію, карбонатів, металофторидів, сульфатів та інгібіторів для зменшення злежування. Принцип його дії це інгібування реакцій горіння; утворення ізолюючої оболонки на

поверхні матеріалу та припинення доступу кисню до полум'я. Методами випробування визначають ефективність гасіння пожеж класу А -дерев'яні осередки, дерев'яні драбинки, полімерні матеріали, класу В - лотки з рідиною (n-гептан, бензин) та класу С - газові горілки та модельні установки під тиском. Під час випробування оцінюють ефективну масу порошку, рівномірність покриття, час гасіння та відсутність повторного займання протягом контрольного часу [71, 72]. Випробовують динаміку розпилення і подачі порошку, під час цього вимірюють - тиск подачі (CO_2 , азот або піропатрон), рівномірність викиду з насадок, максимальний та мінімальний радіус покриття та здатність подачі порошку проти конвекційного потоку полум'я [71, 73]. При випробуванні на злежування та вологість порошок поміщають у камеру при високій температурі або при низьких температурах після 24-72 годин проводиться оцінка здатності до шпарування та утворенню грудок [72, 74]. При корозійному тесті порошок наноситься на зразки металів: сталь, алюміній або мідь. Вимірюється швидкість корозії та електропровідність залишків [71, 72]. Недоліки методів випробувань порошкових систем пожежогасіння насамперед зумовлені складністю відтворення реальної динаміки пожежі в лабораторних умовах, оскільки стандартні тести не можуть повноцінно врахувати складну геометрію приміщень, перешкоди на шляху розпилення та вплив повітряних потоків. Особливою проблемою є неможливість адекватної кількісної оцінки втрати видимості та впливу на органи дихання людини, що критично для безпечної евакуації, але важко моделюється під час випробувань. Крім того, методи контролю якості вогнегасного порошку часто не дають повної картини щодо його схильності до злежування та грудкування під час тривалого зберігання в корпусі модуля, що може призвести до відмови системи в реальній ситуації.

2.2 Практичні аспекти проведення лабораторних та польових випробувань.

Методи проведення випробувань в лабораторних умовах для стаціонарних системи пожежогасіння та систем аерозольного пожежогасіння визначені у

ДСТУ EN 15276-1 [58]. Так, розділ 7 даного стандарту встановлює повний перелік лабораторних методів випробувань компонентів аерозольних систем пожежогасіння, визначаючи умови, порядок, необхідну кількість зразків та критерії оцінювання. Він включає базові функціональні тести (структурні, температурні, корозійні, вібростійкість), а також ключові випробування, пов'язані з вогнегасною здатністю, захищеною площею та надійністю компонентів. У випробуванні виробник повинен дати 55 одного типоряду, з яких 20 використовуються для випробування функціонування.

Таблиця 2.1 - ДСТУ EN 15276-1, заявка на зразки для випробувань [58].

Метод випробування		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>14</i>
	Кількість зразків	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	5	100
7.3 Перевіряння відповідності будови		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7.6 Випробування з визначення робочих діапазонів температури і відносної вологості повітря													
7.6.2 Випробування на стійкість в умовах вологості повітря		2											
7.6.3 Випробування на стійкість до низької температури			2										
7.7 Випробування на прискорене старіння				2									
7.8 Випробування на корозійну стійкість					2								
7.9 Випробування на корозійну стійкість за жорстких умов експлуатації						2							
7.10 Випробування на вібростійкість							2						

7.11	Випробування на стійкість до падіння										2			
7.13	Випробування на спрацьовування													2
7.14	Випробування на функціонування	3	3	3	3	—	3	3	3				2	
7.14.1	Випробування з визначення тривалості подавання вогнегасної речовини												2	
7.14.2	Випробування з визначення температури струменя вогнегасного аерозолю												2	
7.14.4	Випробування з визначення температури корпусу												2	
7.15	Випробування на стійкість до вогневого впливу										2			

Стандарт [58] наводить таблицю розподілу зразків між методами. Перед початком вогневих та функціональних тестів перевіряють пристрій на відповідність технічній документації, конструкцію корпусу та якість герметизації, а також відповідність маркування, пристрої активації і електричні елементи. Після чого починають саме випробування з визначення показника вогнегасної здатності - потрібно піддавати випробуванням генератор(и) вогнегасного аерозолю, що належать до одного типоряду. Кількість генераторів вогнегасного аерозолю під час випробувань має бути достатньою для забезпечення необхідного значення показника вогнегасної здатності для певної модельної споруди. Для визначення ефективності використання аерозолеутворювальної композиції потрібно зареєструвати масу генератора перед подаванням вогнегасної речовини і після нього. У цьому випробовуванні проводять - гасіння дерев'яного штабеля масивів (модель пожежі А) з

використанням н-гептанового дека як джерела первинного запалювання, проводять контроль температури та кисню у 5 вимірювальних точках і записують тривалість подачі аерозолі, час до повного гасіння, час витримки (10 хв) для відсутності повторного займання. Також визначають захищену площу, суть якої - це перевірити мінімальну висоту та максимальну площу захищеного об'єму, виміряти рівномірність розподілу аерозолі від генератора та підтвердити гасіння усіх дека з гептаном протягом ≤ 30 секунд після завершення подачі [58]. Випробують також генератори вогнегасного аерозолі, на прискорене старіння, метою такого випробовування є підтвердити працездатність генератора після умовного 15-річного строку служби. Таке випробування включає прискорене теплове старіння, контроль роботи після старіння та вимоги до працездатності (згідно цього ДСТУ [58] п.7.7.3). Випробовуючи генератори вогнегасного аерозолі на корозійну стійкість (згідно цього ДСТУ [58] п. 7.8, 7.9), перевіряють стійкість корпусу та елементів до корозії та стійкість до «жорстких умов експлуатації». Вогневі випробування є ключовим етапом перевірки ефективності аерозольних, газових та порошкових систем пожежогасіння. Основна мета цього випробування полягає у перевірці ефективності гасіння модельних пожеж різних класів, здатності аерозолі або газу поширюватися по всьому об'єму, часу гасіння та моменту виникнення повторного займання, впливу теплових потоків та конвекції на поведінку агента, стабільності гасильного ефекту після закінчення подачі та відповідності заявленого “проектного об'єму” і “показника вогнегасної здатності” [58]. Також, вогневі випробування є єдиним способом визначити реальне гасильне навантаження, яке система може витримати, що вказується у сертифікації. Для цього випробування потрібна модельна камера або реальне приміщення, що має: герметичність або контрольовану вентиляцію з можливістю встановлення датчиків температури, кисню, CO/CO₂ з засобами для контролю оптичної густини (дим), теплові щити і бар'єри для моделювання реальних перешкод та з можливістю швидкого аварійного відключення пожежі. Температурні датчики встановлюють по висоті приміщення, на рівнях: 0,2 м; 0,5 м; 1,0 м; 1,5 м; 2,0 м,

згідно з вимогами стандарту. Існують декілька видів модельних осередків пожежі. Так, рідинні пожежі класу В (лотки з н-гептаном) - це основний тест для визначення розподілу вогнегасної речовини по площі, використовують металеві лотки зі встановленою площею поверхні, глибина рідини складає 10–20 мм, стабілізація полум'я становить 60–90 секунд. Дерев'яні штабелі (клас А) - це основний тест для оцінки теплового навантаження. Використовують стандартизований дерев'яний стос масою 1,5–4,5 кг, товщина рейок складає 20–25 мм, кількість шарів становить 6–8. Саме проведення вогневого випробування включає декілька етапів. Перший, це запалювання та стабілізація полум'я - осередок розпалюється та працює до встановлення стабільного режиму горіння (для рідинних лотків — не менше 60 секунд, для дерев'яних штабелів — до моменту появи суцільного полум'я на верхніх шарах). Другий, це активація вогнегасної системи в дію, що може проводитися як дистанційно так і автоматично від датчика або вручну (якщо цього вимагає методика). Третій етап, це викид аерозолі/газу, під час якого фіксують - тривалість викиду, рівномірність хмароутворення, напрямок руху аерозолі та головне початок та кінець гасіння. Четвертий етап висвітлює ефективність гасіння пожежі, що визначається за такими критеріями як: повне згасання всіх осередків, максимальний допустимий час — 30 секунд після завершення подачі агента, зниження температури до стабільного рівня. В кінці проводиться п'ятий етап, це контроль повторного займання у якому, проводиться 10-хвилинний моніторинг області пожежі та фіксується будь-який прояв: жаріння, тління, повторне полум'я [58]. Після цього проводиться оцінювання результатів вогневих випробувань зазначаючи час гасіння (час від моменту активації до повного припинення горіння), теплове навантаження (динаміка температурних датчиків у різних точках приміщення), розподіл аерозолі / газу (оптичних сенсорів, концентраційних датчиків та аналізу диму), ступінь поглинання тепла (визначається падінням температури і швидкістю охолодження). Слід зазначити, що відсутність повторного займання, це головний показник для кабельних трас,

електроцитів та деревини. Сам показник вогнегасної здатності обчислюється як: маса викинутої суміші / об'єм приміщення.

Польові (повномасштабні) випробування проводяться для підтвердження ефективності компонентів і систем аерозольного пожежогасіння у реальних або максимально наближених до реальних умовах. На відміну від лабораторних випробувань, польові тести оцінюють просторовий розподіл аерозолю, гасильну ефективність у повному об'ємі, вплив вентиляції, інерційність системи та відсутність повторного займання. Випробування повинні проводитись у спеціально обладнаному приміщенні або модельній споруді з повним контролем геометрії об'єму, теплового навантаження, параметрів займання, місць встановлення датчиків температури, кисню та оптичної густини та можливості повторного відтворення умов. Вимірювальні точки мають бути розташовані по п'яти зонах висоти для контролю розподілу аерозолю [58]. Визначення захищеної площі та просторового розподілу - метою цього випробування є підтвердження того, що один або декілька генераторів здатні забезпечити гасіння по всій площі та об'єму захищеного приміщення. Основні процедури проводять у наступному порядку. У модельній кімнаті встановлюються деки з н-гептаном, розміщені по площі підлоги (не менш ніж у чотирьох характерних зонах). Далі проводиться їх одночасне запалювання. Після цього активується аерозольна система. Фіксується час до згасання всіх осередків, максимальна відстань, на якій аерозоль залишається ефективним та рівномірність оптичної густини. Критерій ефективності це те, що усі осередки повинні бути погашені не пізніше ніж через 30 секунд після завершення викиду аерозолю. Визначення показника вогнегасної здатності - це ключовий повномасштабний тест, який безпосередньо прив'язаний до пункту 7.4 ДСТУ EN 15276-1 [58]. Методика передбачає побудову дерев'яного штабеля (wood crib) відповідно до параметрів стандарту або використання дека з н-гептаном як джерела запалювання з встановленням температурних і газоаналізаторних датчиків та активацію генератора після виходу полум'я на стабільний режим. Протоколювання полягає у фіксуванні часу гасіння, динаміки температури, зниження концентрації кисню,

оптичної щільності та об'ємної концентрації сухої речовини. Після гасіння проводиться 10-хвилинний контроль відсутності повторного займання. Розрахунок показника вогнегасної здатності визначається діленням маси викинутої композиції на об'єм модельної кімнати. Також є випробування на імітацію реального теплового навантаження. Ці тести підтверджують, що система стабільно працює при різних початкових умовах, забезпечує гасіння пожеж із різним тепловим навантаженням та не допускає рекомбінації частинок та втрати активного аерозолі у важкодоступних зонах. У цьому методі розміщують кілька типів модельних осередків (кабельні траси, електрощити, плоскі осередки). Виконують запалювання у контрольованій послідовності, активують системи після чого спостерігають та вимірюють повноту заповнення приміщення, нерівномірності хмароутворення, стійкість гасильного ефекту при високих температурах.

Проведення лабораторних та польових випробувань є ключовим етапом оцінювання працездатності і ефективності вогнегасних систем різних типів - газових, аерозольних та порошкових. Лабораторні методики (Cup Burner Test, визначення мінімальної вогнегасної концентрації, тестування розподілу агента, динаміки подачі та фізико-хімічних властивостей) забезпечують базову інформацію про гасильні характеристики та дозволяють стандартизувати результати в контрольованих умовах. Водночас вони не враховують складної аеродинаміки реальних приміщень, дії теплових потоків та впливу вентиляції.

2.3 Виявлення типових помилок та невідповідностей у процесі тестування

Процес випробувань вогнегасних систем, передбачений у багатьох ДСТУ EN [64–74] та містить детально регламентовані вимоги до проведення лабораторних, функціональних і повномасштабних випробувань. Однак аналіз практики тестування та порівняння результатів сертифікаційних і експлуатаційних випробувань показує наявність низки типових помилок і невідповідностей, що можуть суттєво впливати на достовірність оцінювання ефективності систем. Так,

є наявною невідповідність підготовки та відбору зразків вимогам стандартів. У ДСТУ EN 15276-1 передбачено обов'язковий відбір великої кількості зразків одного типоряду (до 55 одиниць), які мають бути розподілені між численними випробуваннями (корозія, старіння, вібростійкість, вогневий вплив, функціональні тести). На практиці часто спостерігаються такі порушення, як занижена кількість поданих зразків, що не дозволяє коректно провести весь перелік досліджень та надання зразків різних партій, що суперечить вимогам до типоряду та спотворює результати. Адже ДСТУ EN 15276-1 [58] вимагає, щоб усі подані зразки належали до одного типоряду (однакова конструкція корпусу, однаковий тип пускового елемента, однакова хімічна композиція; однакові виробничі технології). Типова практична помилка, це подання зразків із різних партій, що відрізняються: складом порошку чи аерозольної композиції, товщиною металу корпусу, типом піропатрона, технологією герметизації [58]. Такі зразки не можуть вважатися однорідними, тому результати випробувань не є репрезентативними для серійного виробництва. Проте головне порушення це відсутність попереднього контролю геометрії та технічної документації, хоча п. 7.3 ДСТУ EN 15276-1 [58] прямо вимагає перевіряння відповідності будови перед початком будь-яких випробувань. Такі порушення призводять до некоректності кінцевого визначення показника вогнегасної здатності та розподілу агента [58].

Невідповідностями під час проведення вогневих випробувань є те, що у лабораторних тестах (вплив вологості, низької температури, старіння, вібростійкості та корозії), які регламентовані розділом 7 ДСТУ EN 15276-1 [58], часто фіксують такі типові недоліки, як ігнорування вимог до стабілізації температури зразка перед тестом (пункти 7.6.1–7.6.3), недотримання тривалості циклів волого-теплого режиму. Це дає хибно позитивні результати у вигляді некоректного встановлення зразків при вібротестах, що знижує навантаження і не виявляє прихованих дефектів та спрощення корозійних тестів, зокрема зменшення концентрації соляного туману або часу експозиції [58]. Такі порушення особливо критичні для аерозольних систем, де корозія корпусу та

деградація композиції безпосередньо впливають на стабільність викиду речовини. Вогневі тести є ключовою частиною оцінки ефективності систем, проте найчастіше саме на цьому етапі допускається таке порушення, як неправильне формування модельних осередків пожежі, тобто дерев'яні штабелі не відповідають масі, вологості та геометрії, визначеним у стандарті або рідинна дека заповнюється неправильним шаром пального (менше 10 мм або без стабілізації полум'я) та відсутність однакових умов запалювання. Поряд із цим спостерігається недотримання вимог до встановлення датчиків. Стандарти вимагають чітко визначені висоти розміщення датчиків температури та кисню (п'ять рівнів, рівномірне розташування). Проте часто датчики встановлюють тільки на одній висоті, ігноруюче контроль оптичної густини, хоча він є критичним для аерозольних систем та використовують різні типи датчиків, не відкаліброваних між собою. Також, одним з порушень є передчасна або запізнена активація системи - активація проводиться до стабілізації полум'я, випробовувач вручну змінює момент запуску, що суперечить процедурі та впливає на час гасіння. Невідповідність вимогам до герметичності приміщення NFPA 2001 вимагає виконання Fan Test або Door Fan Test. Типові порушення, які виникають при тесті, це відсутність тесту герметичності, неправильна калібровка вентиляційного обладнання та невірне моделювання витоків приміщення. Невідповідність вимогам EN 15004 (газові системи) [66], EN 3 (переносні вогнегасники) [76], EN 2 (класифікація пожеж) [75], полягає у тому, що випробування проводяться не для того класу пожежі, який заявлений виробником та можуть проводитись на моделях пожеж, що не відповідають стандарту (особливо для класу F та класу B). Використовуючи переносні вогнегасники EN 3 з невірною масою заряду та неправильним тиском [76], що може призвести до некоректної сертифікації системи, поширення полум'я через «мертві зони» та недостатній контроль пожежі. Невідповідності специфічних аерозольних систем (за ISO 15779 та NFPA 2010), це невиконання вимог безпеки щодо продуктів згоряння, тому що не проводяться вимірювання CO, CO₂, оксидів азоту та твердих часток аерозолі [68], що може призвести до ризику токсичного

забруднення, неправильного визначення ефективної концентрації та небезпечні залишкові продукти у середовищі.

Невідповідності при польових (повномасштабних) випробуваннях, полягають у тому, що при проведенні повномасштабних тестів, передбачених ДСТУ EN 15276-1 та ДСТУ EN 15276-2, найчастіше порушують герметичність приміщення для повномасштабних випробувань та мають наявні неконтрольовані отвори та витoki, двері не забезпечують герметичності та відсутній контроль тиску під час подачі агента [58, 64]. Це унеможлиблює адекватне визначення часу витримки (hold time) як для газових, так і для аерозольних систем. Використання нестандартної вентиляції, стандарти вимагають контрольованої вентиляції та фіксації її параметрів. Типові помилки при використанні вентиляції під час проведення випробування, це залишені працюючі витяжні канали, неконтрольовані конвекційні потоки та відсутність фіксації кратності повітрообміну [69]. Відсутність повторного підтвердження результату у ряді випадків проводять один тест замість мінімально необхідних серій, що суперечить вимозі відтворюваності. Згідно з п. 7.9 ДСТУ EN 15276-1 [58], генератори повинні пройти випробування на корозійну стійкість за підвищеної вологості, агресивного середовища та різких коливань температури. На практиці ж нерідко тест проводиться без контролю вологості, не витримується час експозиції та не проводиться огляд корпусу після циклів. Це призводить до недостовірної оцінки довговічності та стійкості до старіння. Невідповідність вимогам до часу заповнення приміщення (п. 7.6.1) згідно ISO 14520 [65], встановлює, що час заповнення газового агента має бути ≤ 10 секунд для інертних газів і ≤ 60 секунд для хімічних. При цьому замість фактичного вимірювання застосовуються розрахункові дані та не проводиться фіксація тиску під час подачі. Також, однією з критичних проблем у процесі випробувань вогнегасних систем є недоліки у документуванні, неповнота протоколів та порушення процедур проведення тестів. Правильне оформлення та фіксація результатів є обов'язковою вимогою більшості міжнародних стандартів (ISO 14520, EN 15276-1/2, NFPA 2001, NFPA 2010, UL 2775), які наголошують, що

якість документування безпосередньо впливає на можливість сертифікації системи та її безпечну експлуатацію [58, 64, 65, 69]. У багатьох випадках протоколи випробувань не містять повного переліку даних, які повинні бути задокументовані згідно з ISO 14520 або ДСТУ EN 15276-1, зокрема: параметри активації системи (тиск, струм, час затримки), температура та концентрація кисню в контрольних точках та фактичний час гасіння та час повторного займання [58, 65]. Відповідно до EN 15276-1 та NFPA 2001, при вогневих випробуваннях вимірювальні точки мають бути розміщені на різних висотах та у контрольних зонах приміщення. Частими порушеннями є недостатня кількість датчиків (менше 5 по висоті), їх нерівномірне розташування та відсутність датчиків у «мертвих зонах» - це призводять до викривлення реальної картини розподілу агента, що особливо критично для газових і аерозольних систем [58, 67]. За стандартом необхідно фіксувати: температуру в усіх точках приміщення (п. 7.14.2), зміну маси генераторів до і після (п. 7.14.1), час повного гасіння (п. 7.15.1), наявність повторного займання після 10-хвилинного контролю (п. 7.15.2) [58]. При цьому допускають пропуск хоча б одного параметра, відсутність фото- та відеофіксації активації та некалібровані датчики температури. Згідно з ДСТУ 3675 та ДСТУ EN 15276-2, обов'язковими є опис конструкції та принципу дії, інформація про межі експлуатації (температура, вологість) та відомості про контрольовані параметри при випробуваннях [3, 64]. Проте існують такі поширені невідповідності, як відсутність актуальної технічної документації, невірна маса агента, зазначена в паспорті та відсутність даних про термін служби та результати прискорених випробувань.

Існують порушення безпеки праці під час проведення випробувань, до прикладу відсутність евакуаційної зони для операторів, випробування без контролю рівня СО у приміщенні (критично для аерозолів), відсутність теплових бар'єрів та не ведення журналу безпеки праці згідно з NFPA 2010, NFPA 12A та EN 15276-1 [58]. Більшість міжнародних стандартів ISO вимагають обов'язкової відеофіксації з моменту займання та моменту подачі агента до динаміки формування хмари та гасіння та контролю повторного займання, при цьому

роблять неповний відеозапис з відсутнім маркуванням часу та оглядових камер. Неправильне формування звіту за результатами випробувань, полягає у тому, що звіти не містять висновку про відповідність/невідповідність, відсутнє посилання на конкретний пункт стандарту та даних про невдачі або відхилення. У деяких випадках додаються лише «усереднені значення», без первинних даних, що суперечить вимогам ISO.

2.4 Оцінка ефективності випробувань у контексті пожежної безпеки

Ефективність випробувань вогнегасних систем у контексті пожежної безпеки визначається не лише здатністю системи успішно пройти регламентовані лабораторні чи повномасштабні тести, а й ступенем відповідності отриманих результатів реальним сценаріям розвитку пожежі та умовам експлуатації об'єктів. У сучасній практиці пожежної безпеки випробування виконують подвійну функцію: з одного боку - підтверджують відповідність систем вимогам нормативних документів, з іншого - слугують інструментом прогнозування поведінки системи під час реальної пожежі.

Таблиця 2.2 - Методи випробувань, показники та ризики систем автоматичного пожежогасіння.

Вид випробування	Тип системи	Основний показник пожежної безпеки	Виявлені ризики та невідповідності	Нормативний документ
Cup Burner Test	Газові	Мінімальна вогнегасна концентрація	Недостатня концентрація агента для реального теплового навантаження; ігнорування тління	ISO 14520; EN 15004; NFPA 2001

Full-Scale Fire Test	Газові, аерозольні, порошкові	Реальна здатність гасіння пожеж класів А, В	Нерівномірний розподіл агента; повторне займання; перевищення часу гасіння	NFPA 2001; ДСТУ EN 15276-1
Enclosure Tightness Test (Room Integrity Test)	Газові	Утримання проектної концентрації (hold time)	Витоки через огорожувальні конструкції; деформація дверей і клапанів	ISO 14520; NFPA 2001
Extinguishing Test (wood crib, liquid tray)	Аерозольні	Час гасіння, повнота пригнічення полум'я	«Мертві зони»; залежність результату від геометрії камери	ДСТУ EN 15276-1; EN 15276-2
Reflash Test	Аерозольні	Стійкість до повторного займання	Недостатня концентрація аерозолю після осідання; тління полімерів	EN 15276-2
Hold Time Test (аерозоль)	Аерозольні	Збереження ефективної концентрації	Осідання частинок; вертикальне розшарування	EN 15276-1
Випробування динаміки подачі порошку	Порошкові	Рівномірність покриття осередку	Екранування полум'я; винос порошку конвекцією	ДСТУ 3675
Корозійні випробування	Порошкові	Безпечність після гасіння	Корозійне пошкодження обладнання; вторинні відмови	ДСТУ 3675

Аналіз вимог стандартів EN 15004, ISO 14520, NFPA 2001 та ДСТУ EN 15276-1/2 свідчить, що більшість методик випробувань орієнтовані на стандартизовані модельні сценарії пожеж [58, 64–67]. Такі сценарії забезпечують відтворюваність результатів і можливість порівняння різних систем, однак вони не завжди повністю відображають складну динаміку реальних пожеж, неоднорідний

розподіл теплового навантаження, складну геометрію приміщень, вплив вентиляції, протягів і локальних конвекційних потоків та наявність прихованих осередків горіння (кабельні канали, фальшпідлоги, технічні порожнини). У зв'язку з цим ефективність випробувань у контексті пожежної безпеки слід оцінювати за принципом достатності, тобто здатності випробувань виявити критичні відмови системи ще на етапі сертифікації. Лабораторні тести (Cup Burner Test, випробування фізико-хімічних властивостей агента, температурні та корозійні цикли) забезпечують базову перевірку гасильного потенціалу, проте лише повномасштабні та польові випробування дозволяють оцінити ефективність системи в умовах, близьких до реальних. Відповідно до вимог ISO 14520 та EN 15004, ефективність газових систем пожежогасіння визначається насамперед здатністю створити та утримувати в приміщенні проектну концентрацію вогнегасного агента протягом встановленого часу витримки (hold time) [65, 66]. Такий підхід ґрунтується на припущенні квазістаціонарних умов пожежі та рівномірного розподілу агента, що є обґрунтованим для модельних лабораторних сценаріїв, але не завжди відповідає реальним умовам експлуатації. У реальній пожежній обстановці на ефективність гасіння істотно впливають додаткові фактори, які або частково, або взагалі не враховуються під час стандартних випробувань. Зокрема, не враховуються інтенсивність тепловиділення (Heat Release Rate, HRR), стратифікація температури та газів по висоті приміщення, турбулентні конвекційні потоки, наявність прихованих порожнин і локальних осередків тління. Наукові дослідження з моделювання пожежних процесів підтверджують, що навіть за досягнення нормативної концентрації вогнегасної речовини локальні температурні піки та нерівномірний розподіл агента можуть призводити до збереження умов для повторного займання [60, 61].

Для аерозольних вогнегасних систем взаємозв'язок між результатами випробувань і реальною пожежною обстановкою є ще більш складним. Фізико-хімічні властивості аерозолю зумовлюють його осідання, агрегацію частинок та вертикальне розшарування концентрації. У високих або геометрично складних

приміщеннях це може призводити до ситуації, коли нормативно підтверджена ефективність не забезпечує повного об'ємного захисту. EN 15276-1 та EN 15276-2 частково враховують ці аспекти, однак результати сучасних досліджень свідчать про необхідність подальшого вдосконалення методик оцінювання [61]. Відповідно до положень ДСТУ EN 15276-2, результати випробувань систем аерозольного пожежогасіння мають розглядатися у тісному зв'язку з конкретними умовами захищуваного об'єкта, тому що методи випробувань і розрахункові показники не охоплюють усіх можливих експлуатаційних сценаріїв [64]. ДСТУ EN 15276-2 встановлює, що проєктний показник вогнегасної здатності формується з урахуванням коефіцієнтів запасу, параметрів вентиляції, негерметичності приміщення та тривалості подавання аерозолю. Водночас у реальній пожежній обстановці ці параметри можуть змінюватися динамічно, зокрема внаслідок руйнування огорожувальних конструкцій, неконтрольованого відкривання прорізів або роботи систем димовидалення [64].

Отож результати випробувань слід розглядати не як абсолютну гарантію пожежної безпеки, а як індикатор імовірної поведінки системи за певних умов. Для підвищення відповідності між випробуваннями та реальною пожежною обстановкою необхідним є поєднання лабораторних і повномасштабних методик, аналіз граничних сценаріїв пожежі, урахування специфіки об'єкта захисту та критична інтерпретація результатів з позицій ризик-орієнтованого підходу. Такий підхід дозволяє мінімізувати розрив між нормативною оцінкою ефективності вогнегасних систем і їх реальною здатністю забезпечувати пожежну безпеку в умовах сучасних техногенних та експлуатаційних ризиків. У цьому контексті особливої актуальності набуває розгляд потенційних ризиків, експлуатаційних обмежень та наслідків невідповідності систем пожежогасіння реальним умовам об'єкта.

Роль вогневих випробувань у забезпеченні пожежної безпеки полягає у тому, що вогневі випробування є ключовим елементом оцінювання ефективності аерозольних, газових і порошкових систем пожежогасіння. Саме ці випробування дозволяють визначити реальний час гасіння пожежі, оцінити

стабільність гасильного ефекту після завершення подачі агента, виявити ризики повторного займання та перевірити рівномірність розподілу вогнегасної речовини по об'єму. Ефективність аерозольних систем пожежогасіння значною мірою залежить від геометрії приміщення, ступеня його герметичності, режимів вентиляції та характеру пожежного навантаження. У разі, якщо ці параметри змінюються в процесі експлуатації (перепланування, демонтаж перегородок, поява додаткових вентиляційних отворів), розрахункова концентрація вогнегасного аерозолу може не досягатися, що унеможливує припинення горіння [64]. Важливим ризиком є також неврахування теплової інерції матеріалів і можливості повторного займання. Випробування генераторів аерозолу проводяться в стандартизованих умовах і спрямовані на підтвердження стабільності їх параметрів, однак вони не моделюють тривале теплове навантаження та процеси тління, характерні для реальних пожеж. Унаслідок цього після припинення подавання аерозолу можливе повторне займання матеріалів, особливо у випадку пожеж класу А [58]. Додаткові експлуатаційні обмеження визначені у ДСТУ EN 15276-2:2022, ДБН В.2.5-56:2014 та ДСТУ 4490:2005, де вказано, що аерозольні установки не забезпечують ефективного гасіння матеріалів, схильних до саморозігріву та глибокого тління, а також не призначені для використання в приміщеннях із постійно змінними повітрообмінними режимами [12, 64, 77]. Ігнорування цих обмежень на етапі проектування або експлуатації підвищує ймовірність розвитку пожежі після формального спрацювання системи. Аналогічні ризики характерні і для інших типів об'ємного пожежогасіння. У стандартах підкреслюється, що неврахування витоків, інфільтрації повітря та змін конфігурації приміщення може призвести до втрати проектної концентрації вогнегасної речовини. Це положення підтверджує універсальний характер проблеми та свідчить про необхідність комплексного аналізу умов експлуатації незалежно від типу вогнегасної системи [66].

Таблиця 2.3 - Основні невідповідності систем пожежогасіння реальним умовам експлуатації та їх наслідки.

Потенційна невідповідність	Суть проблеми	Можливі наслідки	Нормативний документ
Недостатня герметичність приміщення	Інфільтрація повітря через отвори, не враховані під час проектування	Недосягнення розрахункової вогнегасної концентрації, неефективне гасіння	ДСТУ EN 15276-2
Зміна геометрії приміщення після введення в експлуатацію	Перепланування, демонтаж перегородок, збільшення об'єму	Зменшення питомої концентрації аерозолю, локальні осередки горіння	ДСТУ EN 15276-2
Активна або неконтрольована вентиляція	Робота припливно-витяжних систем під час пожежі	Винесення вогнегасної речовини з приміщення	ДСТУ EN 15276-2
Неврахування теплової інерції матеріалів	Матеріали продовжують тління після припинення подавання аерозолю	Повторне займання, поширення пожежі	ДСТУ EN 15276-1
Використання системи для пожежонебезпечних матеріалів, не передбачених стандартом	Горючі матеріали, схильні до саморозігріву або глибокого тління	Неповне гасіння або відмова системи	ДСТУ 4490:2005
Відсутність урахування можливості повторного займання	Орієнтація лише на первинне припинення горіння	Виникнення вторинної пожежі після спрацювання системи	EN 15004-1
Формальний підхід до випробувань	Орієнтація лише на лабораторні або сертифікаційні тести	Помилкове уявлення про реальну ефективність системи	EN 15004-1

Відсутність періодичної переоцінки ризиків	Зміна умов експлуатації без коригування проекту	Зростання пожежної небезпеки об'єкта	ДСТУ EN 15276-2, ДСТУ 4490
--	---	--------------------------------------	----------------------------

Наведені в таблиці дані підтверджують, що ключовим чинником зниження ефективності систем пожежогасіння є не технічна несправність обладнання, а невідповідність між проектними умовами та реальною експлуатаційною обстановкою. Це обґрунтовує необхідність поєднання нормативних вимог із систематичним аналізом пожежних ризиків та контролем змін параметрів об'єкта протягом усього життєвого циклу системи.

Комплексний підхід до оцінювання ефективності систем пожежогасіння полягає у тому, що відповідно до вимог ДСТУ EN 15276-1 та ДСТУ EN 15276-2, оцінювання ефективності аерозольних систем пожежогасіння базується на визначенні мінімальної вогнегасної концентрації, часу подавання вогнегасної речовини та здатності системи забезпечити рівномірний розподіл аерозолі в захищуваному об'ємі. Однак зазначені показники визначаються за умов, які є стандартизованими та спрощеними порівняно з реальними сценаріями пожежі, що обмежує можливість їх прямої екстраполяції на об'єкти з ускладненою геометрією, змінними вентиляційними режимами або значним пожежним навантаженням [58, 64].

Аналогічний підхід простежується і в міжнародних стандартах газового пожежогасіння, зокрема в EN 15004-1 та ISO 14520, де прямо зазначено, що відповідність системи вимогам стандарту не гарантує повного усунення ризику повторного займання або локальної втрати вогнегасної концентрації. У цих документах наголошується на необхідності врахування негерметичності приміщень, теплової інерції матеріалів та впливу вентиляції, що підтверджує універсальний характер проблеми незалежно від типу вогнегасного агента [65, 66].

Таблиця 2.4 - Порівняльний аналіз рівнів (методологій) оцінки ефективності систем пожежогасіння.

Рівень оцінювання	Об'єкт аналізу	Основні параметри оцінки	Обмеження підходу	Нормативна / методична база
Нормативний	Система пожежогасіння як технічний виріб	Мінімальна вогнегасна концентрація, час подавання агента, відповідність конструкції	Не враховує реальні умови експлуатації та динаміку пожежі	ДСТУ EN 15276-1, EN 15004-1
Лабораторно-випробувальний	Компоненти та зразки систем	Стабільність параметрів, вогнегасна здатність у стандартних умовах	Спрощена пожежна модель, відсутність реальних теплових навантажень	ДСТУ EN 15276-1, ISO 14520
Повномасштабний	Система в умовах, наближених до реальних	Рівномірність розподілу агента, повторне займання, вплив вентиляції	Висока вартість і складність реалізації	EN 15004-1, ISO 14520

У зв'язку з цим комплексна оцінка ефективності систем пожежогасіння повинна ґрунтуватися на поєднанні нормативно встановлених критеріїв із результатами інженерного аналізу реальних умов експлуатації. Така оцінка передбачає врахування сценаріїв розвитку пожежі, можливих відхилень від проектних параметрів та змін функціонального призначення приміщень упродовж життєвого циклу об'єкта. Особливого значення набуває аналіз здатності системи не лише припинити горіння на початковій стадії, а й запобігти повторному займання в умовах залишкового теплового впливу.

Науково обґрунтований підхід до оцінювання ефективності систем пожежогасіння також передбачає використання розрахункових та сценарних методів аналізу, які дозволяють дослідити розподіл вогнегасної речовини в об'ємі приміщення, вплив конструктивних перешкод і джерел тепла, а також зміну концентрації агента в часі. Такі методи доповнюють результати лабораторних і сертифікаційних випробувань та дають змогу отримати більш об'єктивну картину реальної працездатності системи.

2.5 Механізми поширення аерозолю

Поширення аерозольних вогнегасних частинок у приміщеннях різного призначення є складним багатофакторним процесом, який визначається дією декількох фізико-хімічних механізмів, а саме молекулярною дифузією, конвекцією, турбулентністю, гравітаційним осіданням та іншими. Будь-який із цих факторів впливає на швидкість перенесення частинок, характер їх розподілу в об'ємі приміщення та тривалість збереження вогнегасної концентрації. Однією з ключових проблем в процесі вивчення та моделювання є надійне прогнозування розподілу крапель за вогнегасних рідин після того, як вони покривають відстані від точки крапель/розпилення до зони згоряння полум'я при використанні спринклерних систем або високовисотних наземних систем обприскування, через те що впливають на це фактори наведені вище [78]. Молекулярна дифузія - один з базових механізмів поширення дрібнодисперсних аерозольних частинок, а також це тепловий рух молекул при температурах вище абсолютного нуля. Швидкість цього руху є функцією температури, в'язкості рідини і розміру і форми частинок. Дифузія пояснює чистий потік молекул з області більш високої концентрації до однієї з менших концентрацій. Дифузія відіграє важливу роль для частинок з діаметром меншим 0,2 мкм, які практично не піддаються гравітаційному осіданню. Саме завдяки дифузії створюються умови для заповнення аерозолем важкодоступних зон приміщення, зокрема кутів, задньої частини обладнання та меблів. Конвекція або конвективне

перенесення та повітрообмін - рух повітряних потоків у приміщенні. Джерелами таких потоків може бути природна конвекція (викликана різницею температур), інфільтрація через щілини, відкриті двері та вікна, а також робота систем вентиляції та кондиціонування. У випадку відчинених дверних прорізів конвекція стає переважаючим механізмом перенесення аерозолу між суміжними приміщеннями, значно прискорюючи вирівнювання концентрацій, але одночасно підвищуючи ризик неконтрольованого витоку аерозольної речовини за межі захищеного об'єму.

Турбулентність або турбулентне переміщення - утворюється внаслідок швидкостей повітряних потоків та наявності перешкод у приміщенні. Турбулентні пульсації суттєво підсилюють процеси масо- та теплообміну, зумовлюючи швидкому та відповідно рівномірному розподілу аерозолу по висоті та площі приміщення. Для аерозольних систем пожежогасіння цей механізм є ключовим фактором, оскільки знижує ймовірність утворення локальних зон з недостатньою концентрацією вогнегасних зон.

Гравітаційне осідання вогнегасних частинок відбувається під дією сили тяжіння та визначається їхнім розміром, густиною та властивостями повітряного середовища. Для частинок діаметром 0,5-1 мкм осідання може суттєво впливати на зниження концентрації аерозолу з часом, зокрема у верхніх шарах приміщення. У контексті пожежогасіння це означає, що надмірне збільшення розміру частинок може призвести до зменшення часу ефективної дії аерозолу.

Поширення аерозолу у приміщенні визначається складною взаємодією дифузійних, конвективних, турбулентних та гравітаційних процесів. Урахування всіх вищесказаних механізмів є необхідною умовою для відповідного математичного моделювання та достовірності оцінки ефективності аерозольних систем пожежогасіння. Доведено, що системи на основі аерозолу виявилися найбільш ефективними серед усіх існуючих технологій гасіння пожеж на основі ваги до об'єму та залучили широке поширення застосування [79]. Для оцінки динаміки аерозолу в реалістичному сценарії вивчали просторово-часові характеристики аерозолу натрію та розподіл температури шляхом проведення

експериментів з пожежами у різних приміщеннях. На основі вимірювань спостерігається, що розподіл аерозолу погано перемішується протягом експериментального періоду. Значна різниця в масовій концентрації аерозолу спостерігалася між кожною висотою, між оцінкою та спостереженнями на основі моделі нульового виміру [80]. Тому вивчення пожежного аерозолу покращує пожежну безпеку, скорочує час реагування та покращує загальне управління об'єктами. Також триває дослідження з розробки нових технологій пожежогасіння. Наприклад, досліджуються гібридні системи, які поєднують різні типи вогнегасних агентів або використовують хімічні добавки для підвищення ефективності пожежогасіння. Ці інновації призначені для забезпечення більш різноманітних та ефективних рішень для всіх типів пожеж та середовищ [81].

Таблиця 2.5 — Вплив фізичних механізмів на поширення аерозолу.

Механізм	Основний вплив на процес	Залежність від параметрів	Роль у пожежогасінні
Дифузія	Перенесення частинок із зон високої концентрації в низькі	Температура, розмір частинок	Забезпечує проникнення у важкодоступні зони
Конвекція	Масове перенесення аерозолу потоками повітря	Різниця температур, вентиляція	Основний механізм швидкого поширення
Турбулентність	Інтенсивне перемішування середовища	Швидкість потоків, перешкоди	Вирівнює концентрацію по об'єму
Гравітаційне осідання	Осідання частинок під дією сили тяжіння	Розмір і густина частинок	Зменшує ефективну концентрацію з часом

Математична модель зміни концентрації

Для загального опису процесу поширення аерозолію використано систему диференціальних рівнянь балансу маси для двох приміщень:

$$\frac{dC_1}{dt} = -k_{oc}C_1 - k_{вент}C_1 + k_{обм}(C_2 - C_1)$$

$$\frac{dC_2}{dt} = -k_{oc}C_2 - k_{вент}C_2 + k_{обм}(C_1 - C_2)$$

де:

C_1, C_2 - концентрація аерозольних частинок у першому та другому приміщенні, част/м³;

k_{oc} - коефіцієнт гравітаційного осідання, с⁻¹;

$k_{вент}$ - коефіцієнт гравітаційного видалення, с⁻¹;

$k_{обм}$ - коефіцієнт повітообміну між приміщеннями, с⁻¹;

Перші два доданки у рівняннях описують зменшення концентрації внаслідок осідання та вентиляції, тоді як третій доданок характеризує масообмін аерозолію між приміщеннями через дверний проріз.

Швидкість гравітаційного осідання частинок визначається за формулою Стокса:

$$v_s = \frac{2}{9} \frac{(p_p - p_a)g r^2}{\mu}$$

де:

v_s = швидкість осідання частинки, м/с;

p_p = густина частинок, кг/м³;

p_a = густина повітря, кг/м³;

g = прискорення вільного падіння, м/с²;

r = радіус частинки, м;

μ = динамічна в'язкість повітря, Па·с.

З формули видно, що швидкість осідання пропорційна квадрату радіуса частинки. Це означає, що збільшення розміру частинок у 10 разів призводить до зростання швидкості осідання приблизно у 100 разів, що суттєво впливає на час їх перебування у повітрі.

Коефіцієнт дифузії частинок визначається за рівнянням Ейнштейна–Стокса:

$$D = \frac{k_B T}{6\pi\mu r}$$

де:

D - коефіцієнт дифузії, м²/с;

k_B - стала Больцмана;

T - абсолютна температура, К;

r - радіус частинки, м.

Дана формула показує, що зі зменшенням розміру частинок коефіцієнт дифузії зростає, що пояснює високу здатність ультрадрібних аерозолів швидко поширюватися у приміщенні.

Таблиця 2.6 - Параметри 0,1 мкм та 1 мкм.

Параметр	0,1 мкм	1 мкм	Одиниці
Коеф. дифузії D	2.38×10^{-10}	2.38×10^{-11}	м ² /с
Швидкість осідання v_s	3.02×10^{-7}	3.02×10^{-5}	м/с
Коеф. обміну $k_{обм}$	3.2×10^{-3}	3.2×10^{-3}	1/с

Опрацювання параметрів аерозольних частинок різного розміру вказує, що зі зменшенням діаметру частинок до субмікронного рівня (0,1 мкм) тягне за собою значного зростання коефіцієнта дифузії та суттєвого зниження швидкості гравітаційного осідання. Це створює умови для більш рівного мірного розподілу аерозолю в об'ємі приміщення та тривале збереження вогнегасної концентрації, що є дуже важливим для ефективності аерозольних систем пожежогасіння.

Результати моделювання свідчать, що для частинок розміром 0,1 мкм притаманна висока дифузійна здатність та дуже повільне гравітаційне осідання.

Через це концентрація аерозолю в обох приміщеннях швидко вирівнюється, особливо коли зачиненні двері. При розмірі частинок 1 мкм швидкість осідання зростає, проте знижується загальна концентрація аерозолю, однак процес поширення між приміщеннями залишається ефективним за наявності повітрообміну. Вентиляція суттєво зменшує сумарну концентрацію аерозолю у приміщенні, що з одного боку підвищує безпеку для людей, а з іншого - може знизити вогнегасну ефективність аерозолю.

Таблиця 2.7 - Вплив розміру частинок на ефективність аерозольного пожежогасіння.

Параметр	0,1 мкм	1 мкм	Висновок
Коефіцієнт дифузії D	Високий	Низький	Менші частинки швидше поширюються
Швидкість осідання	Дуже низька	Висока	Великі частинки швидше випадають
Час перебування в повітрі	Тривалий	Короткий	Впливає на тривалість гасіння
Рівномірність розподілу	Висока	Середня	Дрібні частинки ефективніші
Загальна ефективність	Висока	Середня	Оптимальні — субмікронні частинки

Ефективність аерозольного пожежогасіння безпосередньо залежить від розміру частинок. Дрібні субмікронні частинки (~0,1 мкм) мають високий коефіцієнт дифузії, довго утримуються у повітрі та рівномірно розподіляються в об'ємі, що забезпечує тривале й стабільне гасіння. Натомість більші частинки (~1 мкм) швидко осідають, мають нижчу дифузію та менш рівномірний розподіл, що зменшує загальну ефективність. Отже, оптимальним для аерозольних систем є використання дрібних субмікронних частинок, які забезпечують максимальну ефективність і тривалість дії при пожежогасінні.

Таблиця 2.8 - Порівняння вогнегасного аерозолю та діоксиду вуглецю (CO₂).

Параметр	Вогнегасний аерозоль	Діоксид вуглецю (CO ₂)
----------	----------------------	------------------------------------

Розмір частинок	0,05–5 мкм (субмікронні, довго зависають у повітрі)	Молекули газу (~0,33 нм), рівномірна дифузія
Механізм гасіння	Ініціація радикальних реакцій, теплове поглинання частинками	Витіснення кисню (<15%), охолодження при розширенні
Тип поширення	Турбулентне, активне перемішування, швидке заповнення об'єму	Дифузійне, поступове накопичення концентрації
Час досягнення критичної концентрації	7–55 с (залежно від перегородок)	~80 с (при наявності перегородок)
Вплив перегородок	Значно впливає: великі площі затримують поширення	Також уповільнює, але газ поступово вирівнює концентрацію
Критична концентрація для гасіння	~50 г/м ³	~15% об'ємної частки
Переваги	Висока ефективність при мінімальній кількості агента; екологічна безпека	Стабільність, відсутність залишків, охолоджувальний ефект
Недоліки	Може утруднювати гасіння при складній геометрії; потребує...	Повільне поширення; небезпека для людей при високих...

З поданої таблиці слідує, що вогнегасний аерозоль демонструє високу ефективність при мінімальній кількості агента, швидко заповнює приміщення та довго утримується у повітрі. Він є екологічно безпечним, проте його ефективність може знижуватися у приміщеннях зі складною геометрією або великою кількістю перегородок. Найбільш доцільним є застосування у компактних приміщеннях, де потрібна швидка дія. Натомість діоксид вуглецю (CO₂) забезпечує стабільне гасіння без залишків і має охолоджувальний ефект. Водночас він поширюється повільніше, особливо у приміщеннях з перегородками, та становить небезпеку для людей при високих концентраціях. Тому його використання більш виправдане у технічних об'єктах або приміщеннях без постійної присутності людей. Таким чином аерозольні системи

краще підходять для швидкого реагування та екологічно безпечного гасіння у приміщеннях, тоді як CO₂ доцільно застосовувати там, де важлива чистота після гасіння та охолоджувальний ефект, але необхідно враховувати ризики для персоналу.

2.6. Ефективність поширення вогнегасної речовини в об'ємі як ключовий чинник пожежогасіння

Аналіз результатів лабораторних, польових і повномасштабних випробувань вогнегасних систем, проведений у попередніх підрозділах цього розділу, дозволяє встановити ієрархію чинників, що визначають реальну ефективність пожежогасіння. Серед них ключову роль відіграє не стільки хімічна активність вогнегасного агента, скільки його здатність рівномірно поширитися в захищуваному об'ємі та досягти всіх осередків горіння у критично короткий проміжок часу. Саме цей чинник — просторовий розподіл вогнегасної речовини — є визначальним для фактичного результату гасіння пожежі. Теоретичне обґрунтування цього положення ґрунтується на фундаментальних механізмах дії вогнегасних речовин. Для газових агентів (інертні гази, «чисті» хімічні речовини) умовою ефективного гасіння є досягнення мінімальної вогнегасної концентрації (МЕС) в усьому об'ємі захищуваного приміщення — включно з важкодоступними зонами: просторами за технологічним обладнанням, кабельними каналами та фальшпідлогами. Для аерозольних систем вирішальне значення має рівномірність хмароутворення та здатність частинок долати конвекційні потоки, що виникають від джерела горіння. Для порошкових систем — дальність та рівномірність розпилення з урахуванням напрямку конвекційного потоку полум'я.

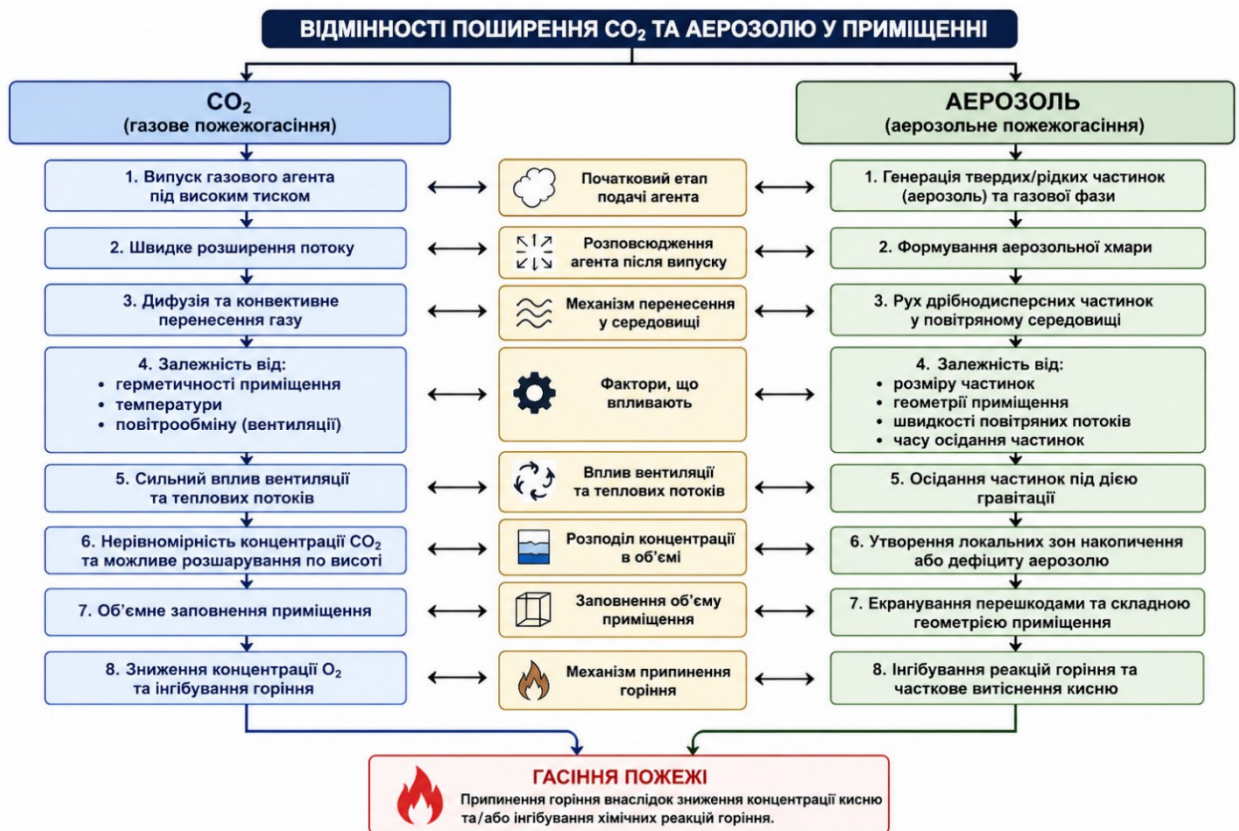


Рис. 2.1. Відмінності поширення аерозолію та CO₂.

У всіх трьох випадках недостатнє просторове покриття безпосередньо призводить до формування «мертвих зон» — ділянок об'єму, де концентрація агента залишається нижчою за порогову, що унеможлиблює повне пригнічення горіння. Кількісним підтвердженням цієї закономірності слугують результати повномасштабних вогневих випробувань. Відповідно до вимог ДСТУ EN 15276-1, ефективність системи підтверджується лише тоді, коли всі модельні осередки пожежі (деки з н-гептаном, розташовані по всій площі підлоги модельної кімнати) гасяться не пізніше ніж через 30 секунд після завершення подачі агента [58]. Це означає, що навіть за достатньої загальної маси вогнегасної речовини система визнається неефективною, якщо хоча б один периферійний або перекритий осередок не отримав необхідної концентрації агента. Аналогічна вимога міститься у NFPA 2001 та ISO 14520 щодо газових систем, де час заповнення об'єму проєктною концентрацією обмежено 10 секундами для інертних газів і 60 секундами для хімічних агентів: при цьому мається на увазі

саме рівномірне об'ємне заповнення, а не локальне нагнітання у точці подачі [65, 67]. Особливої складності проблема просторового розподілу набуває для аерозольних вогнегасних систем, що зумовлено фізичною природою аерозолію як дисперсної системи. На відміну від газів, аерозольні частинки підпорядковуються складній аеродинаміці: вони здійснюють седиментацію під дією гравітації, агрегуються при взаємних зіткненнях та по-різному реагують на конвекційні і турбулентні потоки залежно від розміру. Частинки діаметром менше 1 мкм поведуться подібно до газу і рівномірно заповнюють об'єм, тоді як частинки розміром 5–20 мкм підпорядковуються законам інерційного осадження та осідають на поверхнях, не досягаючи верхніх зон приміщення при подачі знизу або нижніх — при подачі зверху. Ця залежність від дисперсності частинок і конфігурації приміщення пояснює, чому система, що успішно проходить випробування у стандартній тестовій камері, може виявитися неефективною в реальних умовах — при наявності технологічних перешкод, стелажів, відсіків або іншої складної геометрії. Додатковим чинником, що ускладнює просторовий розподіл вогнегасної речовини, є термодинамічна взаємодія агента з полем температур пожежі. Конвекційний потік над осередком горіння може як сприяти переміщенню легких аерозольних частинок до вогнища, так і «відхиляти» потік агента вбік, знижуючи ефективну концентрацію безпосередньо над полум'ям. Цей ефект документально підтверджений у дослідженнях [60] присвячених поведінці водяного туману в умовах висококонвективного горіння рідини, та в роботах з моделювання [60], де показано, що розподіл речовини-агента в турбулентному полум'ї принципово відрізняється від розподілу в спокійному середовищі. Для аерозолів відповідний ефект буде ще більш вираженим через інерційність частинок та їхню взаємодію з тепловим підйомним потоком. Важливо підкреслити, що проблема просторового поширення агента є первинною стосовно ризику повторного займання. Повторне займання виникає переважно не внаслідок повного вичерпання вогнегасної речовини в об'ємі, а через її нерівномірний початковий розподіл, при якому локальні «недогашені» ділянки горіння зберігають достатнє теплове навантаження для ре-активації

після зниження концентрації агента. Таким чином, якість просторового розподілу безпосередньо визначає і час гасіння, і ймовірність повторного займання, і врешті-решт, загальну надійність системи пожежогасіння. Стандарт EN 15276-2 враховує цей зв'язок, запроваджуючи вимогу щодо мінімальної тривалості утримання аерозолу (hold time), однак ця вимога оцінює лише часовий аспект збереження концентрації, а не просторовий аспект її рівномірності [69]. З операційної точки зору ефективність поширення вогнегасної речовини визначається сукупністю взаємопов'язаних параметрів: початковою кінетичною енергією подачі агента (тиск, швидкість викиду); розмірністю та дисперсністю частинок (для аерозольних і порошкових систем); геометрією та розташуванням насадок або генераторів відносно об'єму; ступенем герметичності приміщення, що визначає збереження концентрації; характером вентиляційного режиму та конвекційної динаміки пожежі. Жоден з цих параметрів не може бути оцінений ізольовано — лише їхня інтегральна взаємодія у конкретних умовах захищуваного об'єкта визначає реальний профіль поширення агента.

З урахуванням викладеного обґрунтовується необхідність розробки спеціалізованої методики оцінювання просторового розподілу вогнегасної речовини в об'ємі захищуваного приміщення. Така методика повинна включати: чисельне моделювання динаміки поширення аерозолу різної дисперсності з урахуванням конвекційних полів і геометрії об'єкта; визначення рівномірності концентраційного поля у критичних точках об'єму; верифікацію розрахункової моделі за результатами повномасштабних вогневих випробувань. Лише поєднання розрахункового та експериментального підходів дасть змогу об'єктивно оцінити ефективність поширення агента і, відповідно, реальну захисну спроможність системи пожежогасіння — перейшовши від формальної відповідності нормативним показникам до доказового підтвердження пожежної безпеки об'єкта.

Висновки до розділу 2

У другому розділі дисертаційної роботи проведено комплексний аналіз методології та практики випробувань систем пожежогасіння різних типів - газових, аерозольних і порошкових. Досліджено сучасні підходи до лабораторних та повномасштабних випробувань, а також проаналізовано нормативні вимоги міжнародних та національних стандартів, зокрема ISO 14520, EN 15004, NFPA 2001, EN 15276-1/2 та ДСТУ. Встановлено, що існуючі методики випробувань забезпечують базову оцінку вогнегасної ефективності систем пожежогасіння, однак мають низку обмежень щодо відтворення реальних умов розвитку пожежі. Основними проблемами є складність моделювання теплових потоків, нерівномірність розподілу вогнегасної речовини, вплив вентиляції та геометрії приміщення, а також недостатній контроль ризику повторного займання. Проаналізовано особливості проведення лабораторних і польових випробувань, порядок визначення показників вогнегасної здатності, часу гасіння, концентрації вогнегасної речовини та герметичності приміщень. Визначено, що повномасштабні випробування є найбільш об'єктивним методом оцінювання ефективності систем пожежогасіння, оскільки дозволяють врахувати реальні експлуатаційні фактори. У ході дослідження виявлено типові помилки та невідповідності, що виникають під час проведення випробувань: порушення вимог до підготовки зразків, недотримання параметрів модельних осередків пожежі, некоректне розміщення датчиків, відсутність належного контролю герметичності приміщень та неповне документування результатів. Доведено, що такі порушення можуть суттєво впливати на достовірність оцінювання ефективності систем та призводити до помилкових висновків щодо їх працездатності. На основі проведеного аналізу встановлено, що оцінювання ефективності систем пожежогасіння повинно здійснюватися із застосуванням комплексного підходу, який поєднує лабораторні, повномасштабні та ризик-орієнтовані методи аналізу. Це дозволяє підвищити достовірність результатів

випробувань та забезпечити більш об'єктивну оцінку рівня пожежної безпеки об'єктів.

Розділ 3. Експериментальне визначення ефективності поширення та гасіння об'ємними вогнегасними засобами в приміщення зі складною геометричною конфігурацією.

3.1 Моделювання поширення аерозолію в приміщенні.

Реальні пожежі подеколи характеризуються складним плануванням та геометрією приміщень, наявністю певних перегородок, меблів, дверних прорізів, вентиляційних каналів та інших об'ємно-планувальних особливостей приміщень. Через це, експериментальні дослідження процесів гасіння в таких об'ємах занадто дорогі, трудомісткі та часто обмеженими з точки зору відтворюваності. Використання математичного моделювання дозволяє спрогнозувати розподіл концентрацій аерозолію у часі та просторі, з'ясувати вплив фізичних та хімічних механізмів перенесення, а також окреслити критичні параметри, що впливають на досягнення вогнегасної концентрації. Передусім це актуально є для дрібнодисперсних аерозолів з розміром частинок у діапазоні 0,05–1 мкм, які утворюються в результаті роботи сучасних аерозольних системах пожежогасіння. Розробка нових технологій пожежогасіння спрямована на досягнення ефективного придушення полум'я та зниження температури навколишнього середовища, навіть при мінімізованій кількості агента, що є критичним фактором забезпечення безпеки людей [82].

Вогнегасні аерозолі розглядають не тільки для гасіння приміщень, а й для гасіння об'єктів критичної інфраструктури, зокрема трансформаторів. До прикладу, пожежі трансформаторів становлять значні ризики як для інфраструктури, так і для безпеки людей. При цьому в роботі [83] було проведено дослідження та була подальша розробка технології моделювання пожежі трансформатору в реальних масштабах, а також були оцінені системи пожежогасіння на основі аерозолів. В роботі [84] вказується що аерозолі швидко та ефективно поширюються активно заповнюючи захищені об'єми, при цьому використання аерозолів пов'язане з деякими обмеженнями. Небулайзери та

форсунки, як правило, утворюють аерозольні частинки із середньомасовим розміром 100–500 мкм. Частинки такого розміру швидко осідають під дією сили тяжіння, що призводить до втрат та перевитрат порошкових вогнегасників. На противагу вогнегасним порошкам аерозолі володіють розміром частинок близько 0,1 – 5 мкм, що у порівнянні з порошками забезпечує їхнє безперешкодне поширення на відкритому просторі, але даних стосовно їх поширення у захищуваних об'ємах в науковій літературі майже немає, за винятком праць [85-87]. Результати дослідження параметрів ефективності використання вогнегасних аерозолів і поширення вогнегасних аерозолів в об'ємі наведено у працях здобувача [88, 89]. Загально з них можна сказати, що аерозольні системи пожежогасіння поєднують високу ефективність гасіння завдяки субмікронним частинкам та здатність рівномірно поширюватися у замкнених об'ємах. Їхня ефективність залежить від геометрії простору та організації потоків, але загалом вони є найбільш перспективною альтернативою традиційним газовим агентам у сучасних умовах. З метою визначення ефективності поширення, проникнення та відповідно при цьому часу гасіння у геометрично складних об'ємах було проведено ряд дослідів та встановлено параметри часу гасіння аерозолем та CO₂. З цією метою було розроблено методики з визначення ефективності поширення вогнегасного аерозолу та CO₂ та часу гасіння ними. системи пожежогасіння

Методика з визначення ефективності поширення вогнегасного аерозолу та часу гасіння ним полягає у наступному. В камері об'ємом 0.5 м³ розміром 2x0,5x0,5 м. встановлювались три рівних відсіки з перегородками з ДСП товщиною 10 мм та розмірами 1 - 0,5 x 0,2м; 2- 0,5x0,3м; 3- 0,5x0,4м. В кожному відсіку встановлювався тигель з н-гептаном об'ємом 100 мл.

Методика дослідження гасіння у вертикальній камері полягала у наступному. В вертикальній шафі встановлювали вогнища на одному рівні, Рівень А - 40 см, Рівень В - 80 см, Рівень С - 120 см, на рівні С встановлювалось вогнище. Запалювали тигель на рівні С та після 1 хвилини в нижній частині об'єму забезпечували подавання вогнегасної речовини. Наступне дослідження

проводилось у вертикальній камері на рівні А встановлювалось вогнище. Запалювали тигель на рівні А та після 1 хвилини в верхній частині об'єму забезпечували подавання вогнегасної речовини. Фіксували час гасіння та візуально проникнення вогнегасного агенту на відповідні рівні.

Дослід з визначення ефективності поширення об'ємного вогнегасного засобу та визначення часу створення вогнегасної концентрації в зазначеній камері проводився наступним чином. Спочатку одночасно підпалювали тиглі з н-гептаном та давався час на їх розгоряння 1 хв. Після зазначеного часу в крайньому відсіку підпалювали 12,5 г АУС та закривали герметично двері камери. Фіксували час гасіння у першому, другому та третьому відсіках. Для підпалювання тигля з н-гептаном та АУС використовували газовий пальник. Дані отримані в результаті експерименту наведені у відповідних таблицях. Процедура проведення випробування наступна.

З метою визначення ефективності поширення вогнегасного засобу об'ємної дії в камері було встановлено перегородки, тиглі та АУС у наступному порядку:

ГОРИЗОНТАЛЬНА КАМЕРА:

1. У вказаній вище горизонтальній камері встановлюється одна мала перегородка 0,2*0,5м, посередині, біля стінки камери, два тиглі з н-гептаном розміщувались по різні боки від перегородки, АУС розміщувався біля ближньої стінки камери, рисунок 3.1.1.

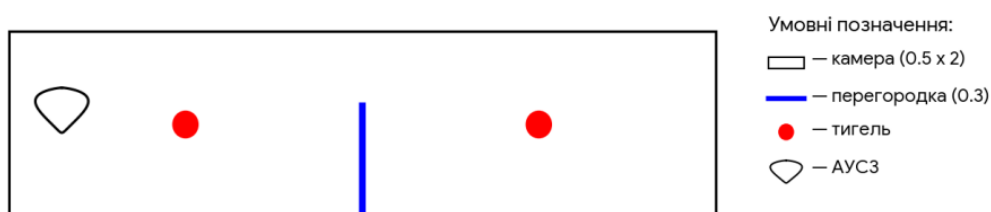


Рис. 3.1.1.

2. У вказаній вище горизонтальній камері встановлюється одна середня перегородка 0,3*0,5м, посередині, біля стінки камери, два тиглі з н-гептаном розміщувались по різні боки від перегородки, АУС розміщувався біля ближньої стінки камери, рисунок 3.1.2.

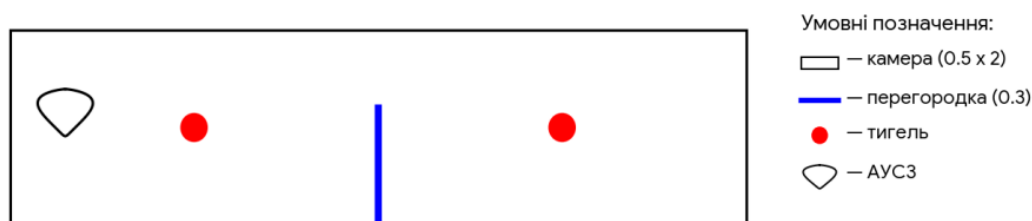


Рис. 3.1.2

3. У вказаній вище горизонтальній камері встановлюється одна велика перегородка 0,4*0,5м, посередині, біля стінки камери, два тиглі з н-гептаном розміщувались по різні боки від перегородки, АУС розміщувався біля ближньої стінки камери, рисунок 3.1.3.

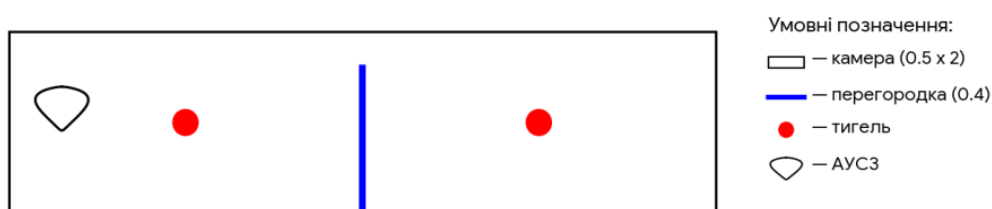


Рис. 3.1.3

4. У вказаній вище горизонтальній камері три зазначені перегородки встановлювались від більшої до меншої у сторону дальньої стінки камери, впритул до однієї стінки камери, три тиглі з н-гептаном розміщувались за перегородками, АУС розміщувався біля ближньої стінки камери, рисунок 3.1.4.

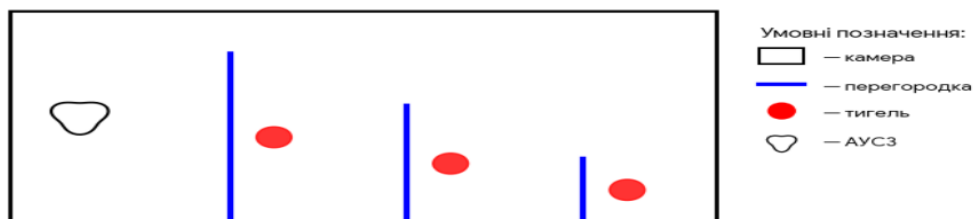


Рис. 3.1.4.

5. У вказаній вище горизонтальній камері три зазначені перегородки встановлювались від меншої до більшої у сторону дальньої стінки камери, впритул до однієї стінки камери, три тиглі з н-гептаном розміщувались за перегородками, АУС розміщувався біля ближньої стінки камери, рисунок 3.1.5.

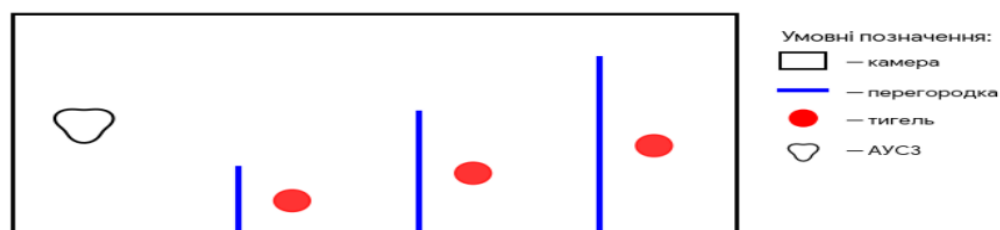


Рис. 3.1.5.

6. У вказаній вище горизонтальній камері три зазначені перегородки встановлювались у шахматному порядку від меншої до більшої у сторону дальньої стінки камери, впритул до однієї стінки, при цьому середня перегородка встановлюється впритул до протилежної стінки камери, три тиглі з н-гептаном розміщувались за перегородками, АУС розміщувався біля ближньої стінки камери, рисунок 3.1.6.

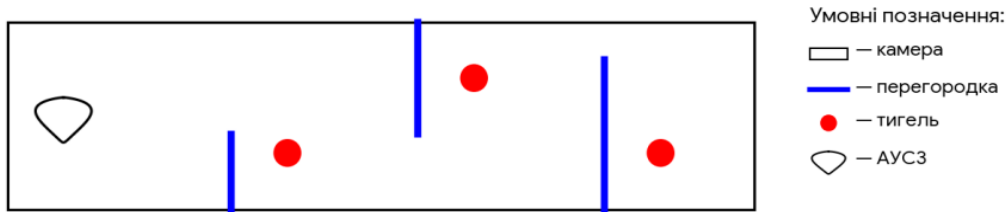


Рис. 3.1.6.

7. У вказаній вище горизонтальній камері три зазначені перегородки встановлювались у шахматному порядку меншої до більшої у сторону дальньої стінки камери, впритул до однієї стінки, при цьому середня перегородка встановлюється впритул до протилежної стінки камери, три тиглі з н-гептаном розміщувались за перегородками, АУС розміщувався біля ближньої стінки камери, рисунок 3.1.7.

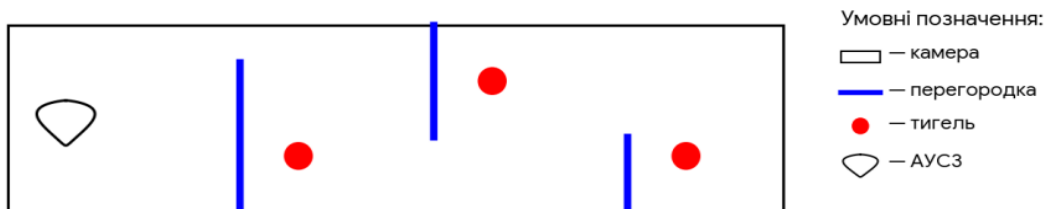


Рис. 3.1.7.

ВЕРТИКАЛЬНА КАМЕРА:

8. У вказаній вертикальній камері встановлюється одна мала перегородка 0,2*0,5м, посередині, біля стінки камери, впритул до однієї стінки камери, тигель з н-гептаном розміщували на перегородці, АУС розміщувався в низу камери, рисунок 3.1.8.

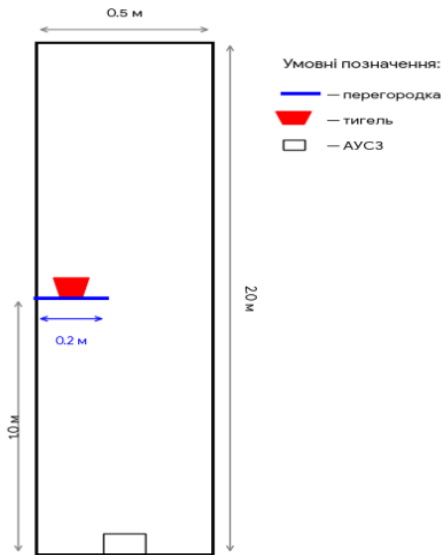


Рис. 3.1.8.

9. У вказаній вертикальній камері встановлюється одна середня перегородка $0,3 \times 0,5$ м, посередині, біля стінки камери, впритул до однієї стінки камери, тигель з н-гептаном розміщували на перегородці, АУС розміщувався в низу камери, рисунок 3.1.9.

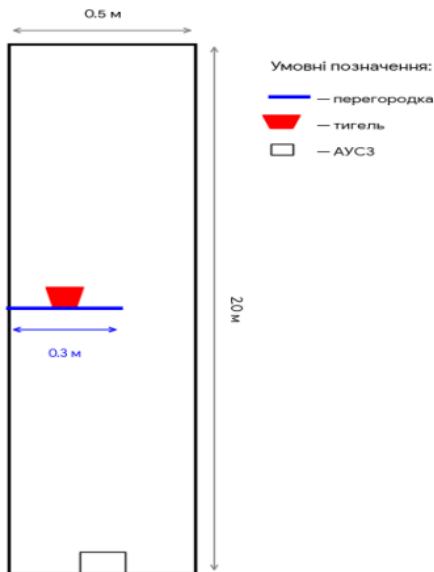


Рис. 3.1.9

10. У вказаній вертикальній камері встановлюється одна велика перегородка $0,4 \times 0,5$ м, посередині, біля стінки камери, впритул до однієї стінки камери, тигель з н-гептаном розміщували на перегородці, АУС розміщувався в низу камери, рисунок 3.1.10.

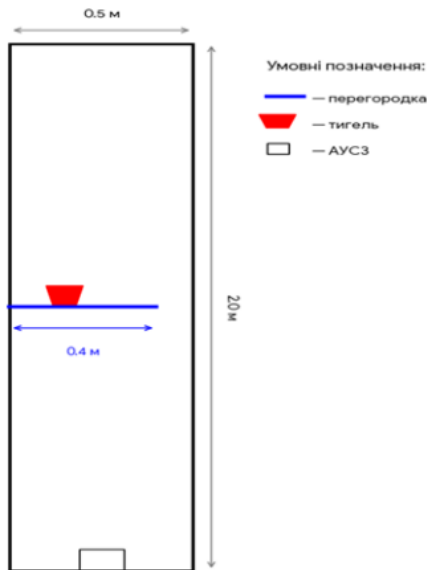


Рис. 3.1.10.

11. У вказаній вертикальній камері три зазначені перегородки встановлювались від більшої до меншої у сторону верхньої стінки камери, впритул до однієї стінки камери, три тиглі з н-гептаном розміщувались на перегородках, АУС розміщувався в низу камери, рисунок 3.1.11.

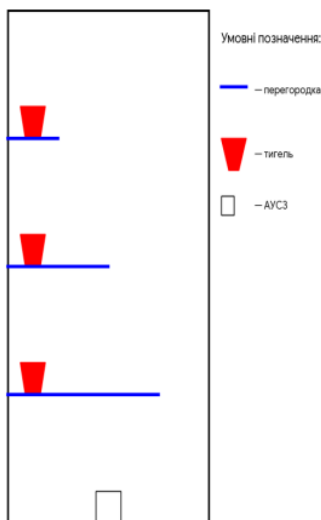


Рис.3.1.11

12. У вказаній вертикальній камері три зазначені перегородки встановлювались від меншої до більшої у сторону верхньої стінки камери,

впритул до однієї стінки камери, три тиглі з н-гептаном розміщувались на перегородках, АУС розміщувався в низу камери, рисунок 3.1.12.

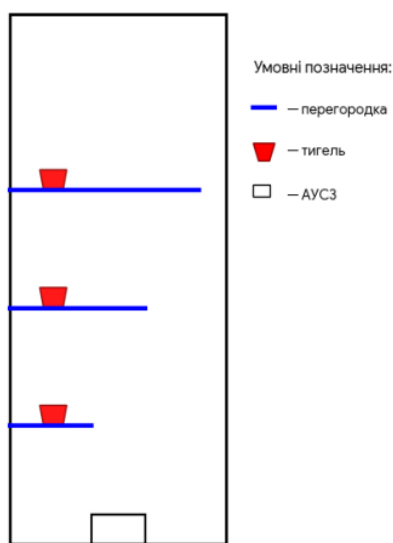


Рис. 3.1.12.

13. У вказаній вертикальній камері три зазначені перегородки встановлювались у шахматному порядку від більшої до меншої у сторону верхньої стінки камери, впритул до однієї стінки, при цьому середня перегородка встановлюється впритул до протилежної стінки камери, три тиглі з н-гептаном розміщувались на перегородках, АУС розміщувався в низу камери, рисунок 3.1.13.

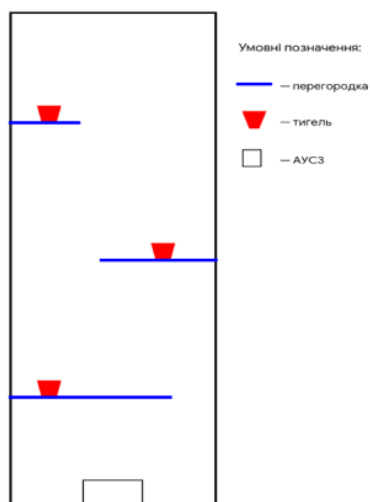


Рис.3.1.13.

14. У вказаній вертикальній камері три зазначені перегородки встановлювались у шахматному порядку від меншої до більшої у сторону верхньої стінки камери, впритул до однієї стінки, при цьому середня перегородка встановлюється впритул до протилежної стінки камери, три тиглі з н-гептаном розміщувались на перегородках, АУС розміщувався в низу камери, рисунок 3.1.14.

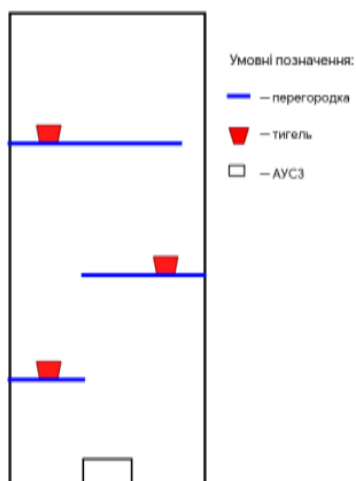


Рис 3.1.14.

15. У вказаній вертикальній камері три зазначені перегородки встановлювались від більшої до меншої у сторону верхньої стінки камери, впритул до однієї стінки камери, три тиглі з н-гептаном розміщувались на перегородках, АУС розміщувався зверху камери, рисунок 3.1.15.

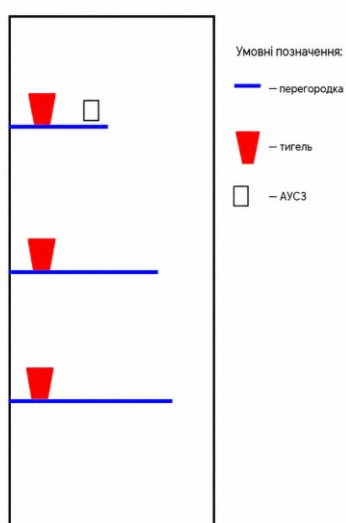


Рис. 3.1.15.

16. У вказаній вертикальній камері три зазначені перегородки встановлювались від меншої до більшої у сторону верхньої стінки камери, впритул до однієї стінки камери, три тиглі з н-гептаном розміщувались на перегородках, АУС розміщувався зверху камери, рисунок 3.1.16.

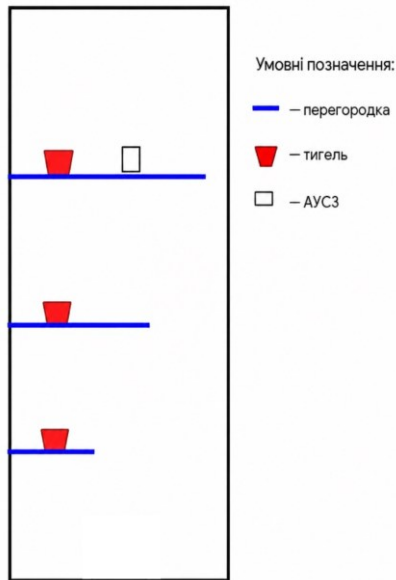


Рис.3.1.16.

Після розміщення всіх засобів одночасно підпалювали тиглі з н-гептаном та давався час на розгоряння 1хв. Після зазначеного часу підпалювали 12,5 г АУС та закривали герметично двері камери. Фіксували час гасіння кожного тигля.

Аналогічні випробування проведено з використанням ВВ2.

На рис. 3.1.17 (1.1,1.2) показано розкадровки дослідження при гасінні тиглів з розташуванням перегородки посередині, на рис. 3.1.18. (поз 1.1., 1.2) з розташуванням трьох перегородок з більшої до меншої в кінці камери, а на рис. 3.1.19. з розташування трьох перегородок у вертикальній камері

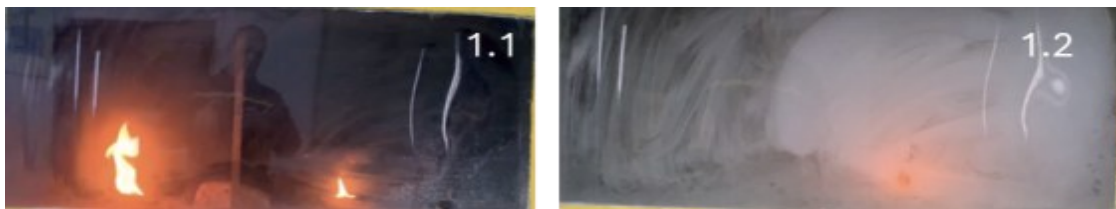


Рис 3.1.17. Кінограма експерименту з визначення ефективності поширення аерозолію через 1 перегородку. (1.1 - початок випробування: 1.2 - 14 секунда)



Рис 3.1.18. Кінограма експерименту з визначення ефективності поширення аерозолю через 3 перегородки виставлених у ряд. (2.1 - початок випробування; 2.2 - 7 секунда секунда; 2.3 - 10 секунда)

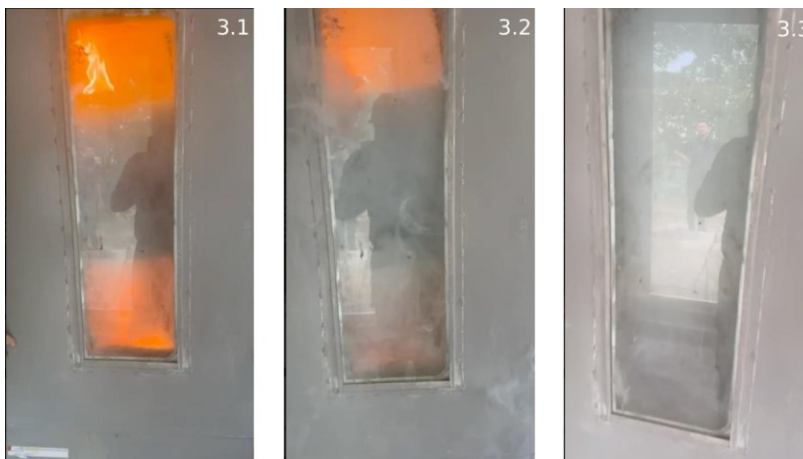


Рис 3.1.19. Кінограма експерименту з визначення ефективності поширення аерозолю через 3 перегородки виставлених 3 ряд у вертикальній камері. (3.1 - початок експерименту; 3.2 - 14 секунда; 3.3 - 20 секунда).

3.2 Результати проведення дослідів з визначення часу гасіння при розділені перегородкою у горизонтальній та вертикальній камері за допомогою вогнегасного аерозолю

Таблиця 3.2.1. Результати проведення дослідів з визначення часу гасіння при розділені однією перегородкою різними розмірами. Методики - 1,2 та 3.

Час	Мала перегородка	Середня перегородка	Велика перегородка
10 сек	Інтенсивне горіння	Інтенсивне горіння	Гасіння першого тигля (7 сек)
12 сек	Гасіння другого тигля	Гасіння першого тигля (11 сек)	Горіння другого тигля

14 сек	Гасіння першого тигля	Горіння другого тигля	Горіння другого тигля
16 сек	-	Гасіння другого тигля (15 сек)	Горіння другого тигля
18 сек	-	-	Гасіння другого тигля (17 сек)



Рис. 3.2.1. Кінограма експерименту з визначення ефективності поширення аерозолю через 1 перегородку поз., (1.1. - початок експерименту; 1.2. - 5 секунда; 1.3 - 10 секунда; 1.4 - 13 секунда)

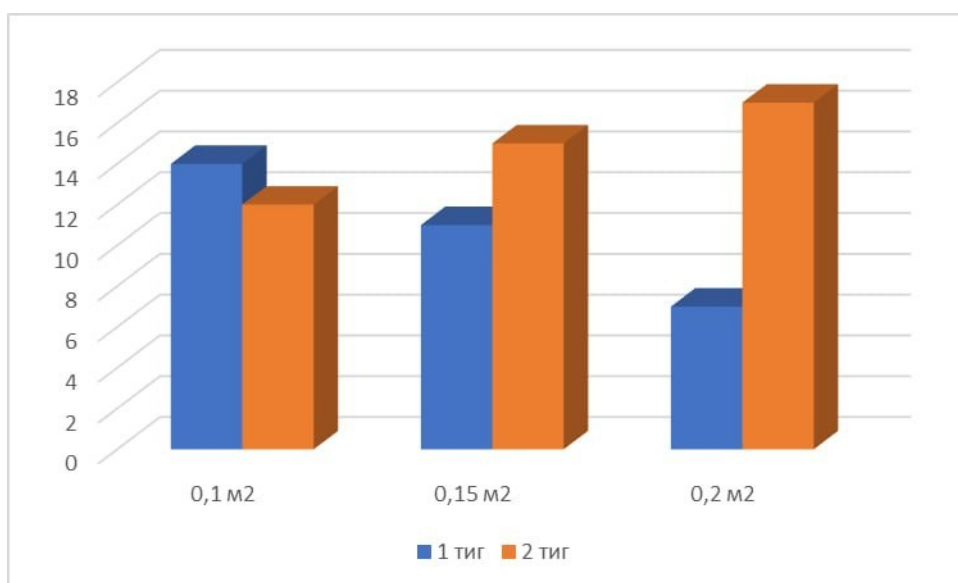


Рис. 3.2.2. Графік залежності від час гасіння та розміру перегородки -
Методики - 1,2 та 3.

Ефективність поширення вогнегасного аерозолі у горизонтальному об'ємі істотно залежить від площі перерізів та конфігурації перегородок. Встановлено, що зі зменшенням площі проходів між відсіками спостерігається збільшення часу гасіння вогнищ, особливо на верхніх рівнях об'єму. Це пояснюється уповільненням масообміну, зниженням швидкості конвективного перенесення аерозолі та формуванням локальних зон недостатньої концентрації вогнегасної речовини. Найкращі результати гасіння були отримані при більшій площі перерізів, оскільки в цих умовах забезпечувалось інтенсивніше перемішування аерозольної хмари та швидше формування вогнегасної концентрації у всьому об'ємі. Отримані результати підтверджують, що геометричні параметри приміщення та розміри прорізів суттєво впливають на ефективність аерозольного пожежогасіння.

Таблиця 3.2.2. Результати проведення дослідів з визначення часу гасіння при розділенні трьома перегородками. Методика 4 та 5.

1	Послідовно розташовані від великої до малої перегородки	1 тиг – 18 2 тиг – 21 3 тиг – 25	Спостерігалось інтенсивне перемішування аерозолі через верхню частину приміщення навіть після гасіння.
2	Послідовно розташовані від малої до великої перегородки	1 тиг – 7 2 тиг – 10 3 тиг – 35	Спостерігалось інтенсивне перемішування аерозолі через верхню частину приміщення. Після гасіння 2 тигля гасіння 3 тигля відбулось значно пізніше через 55 секунд.

Таблиця 3.2.3. Ефективність гасіння аерозолем з різними перегородками виставлених у ряд. Методика 4 та 5.

Час	Перегородка : велика - середня - мала	Перегородка : мала - середня - велика
10 сек	Інтенсивне горіння	7 сек - гасіння першого тигля 10 сек - гасіння другого тигля
15 сек	18 сек - гасіння першого тигля	Горіння третього тигля
20 сек	22 сек - гасіння другого тигля	Горіння третього тигля
25 сек	Гасіння третього тигля	Горіння третього тигля
35 сек	-	Гасіння третього тигля

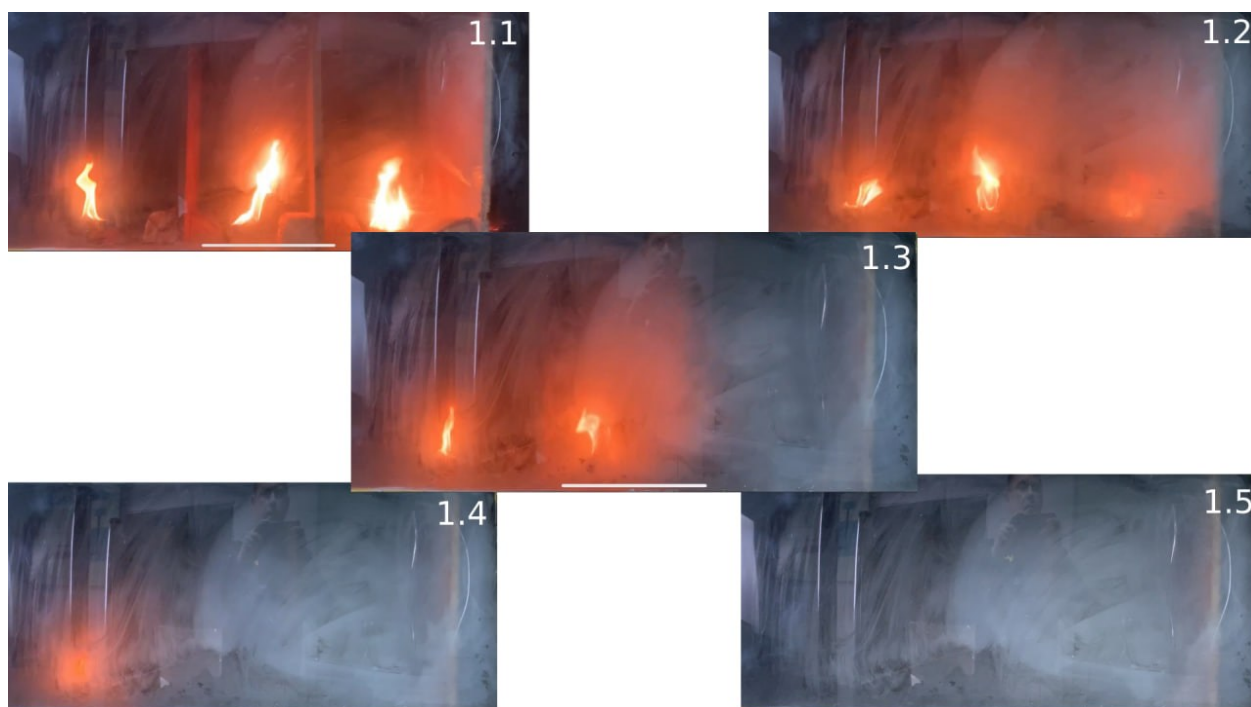


Рис. 3.2.3. Кінограма експерименту з визначення ефективності поширення аерозолію через три перегородки з більшої до меншої в кінці камери поз., (1.1. - початок експерименту; 1.2. - 5 секунда; 1.3. - 7 секунда; 1.4. - 20 секунда; 1.5. - 35 секунда).

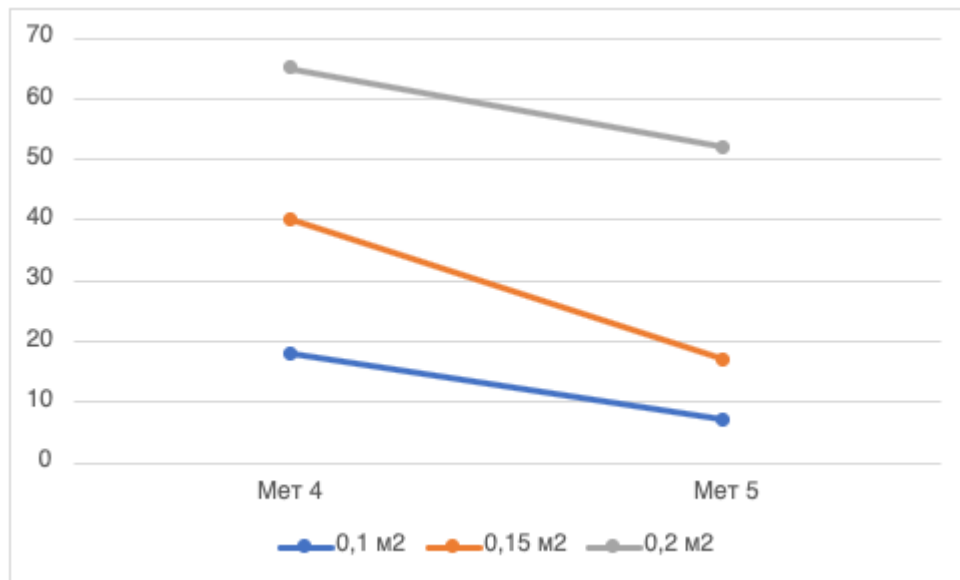


Рис 3.2.4. Графік залежності часу гасіння н-гептану аерозолі від площі трьох перегородок - Методики - 4 та 5.

Як видно з таблиці аерозоль поширюється досить ефективно в об'ємі навіть не враховуючи що є перегородки які обмежують площу вільного розповсюдження аерозолі. Таким чином, виходячи з результатів проведеного експерименту можна сказати наступне. Із збільшенням розмірів площі перегородки час гасіння першого тигля був найменшим, а другого – більшим, при цьому ця величина залежала від площі самої перегородки. Гасіння тигля відбувалось коли аерозоль проникав в сусіднє відділення та створював там вогнегасну концентрацію. При цьому, цілком логічно було отримано результат коли найдальша та найбільша перегородка найбільше стримувала поширення аерозолі, а час гасіння при цьому зростав. З них видно, що час гасіння при використанні перегородки з найбільшою площею зростав відповідно до 17 та 35 секунд. Загалом спостерігалась явище збільшення часу гасіння коли остання перегородка мала найбільшу площу – максимальний час гасіння – 35 секунд. Коли перегородки розташовані в зворотньому порядку, тобто спочатку перегородка максимальної площі, потім по мірі зменшення то час гасіння становив 25 секунд. Таким чином, можна зробити висновок, що поширення вогнегасного аерозолі відбувається досить активно, але не в усіх випадках, а саме, при послідовному розташуванні перегородок (велика → менша) час гасіння значно зріс для всіх тиглів 35 секунд

та 17 секунд при одній перегородці, що вказує на утруднене поширення аерозолі.

Таблиця 3.2.4 Ефективність гасіння аерозолем з перегородками виставлених у шахматному порядку. Методика 6 та 7.

Час	Від меншої до більшої	Від більшої до меншої
5 сек	Гасіння першого тигеля	Інтенсивне горіння
10 сек	Гасіння другого тигеля	Горіння
15 сек	Горіння третього тигеля	Горіння
20 сек		16 сек - гасіння першого тигеля
25 сек		21 сек - гасіння другого тигеля
30 сек		26 сек - гасіння третього тигеля
35 сек	32 сек - гасіння третього тигеля	-

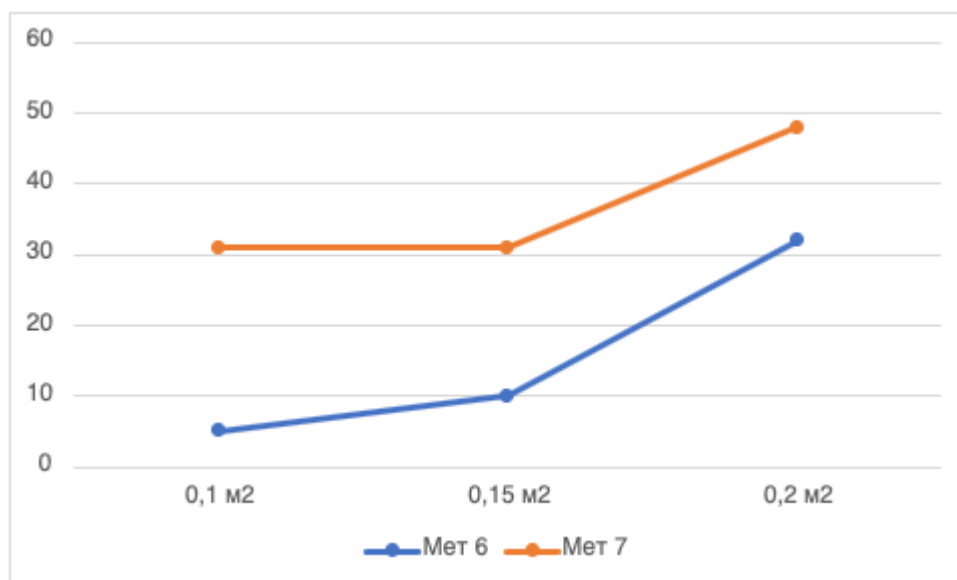


Рис 3.2.5. Графік залежності часу н-гептану аерозолі від площі трьох перегородок виставлених у шахматному порядку - Методика 6 - 7

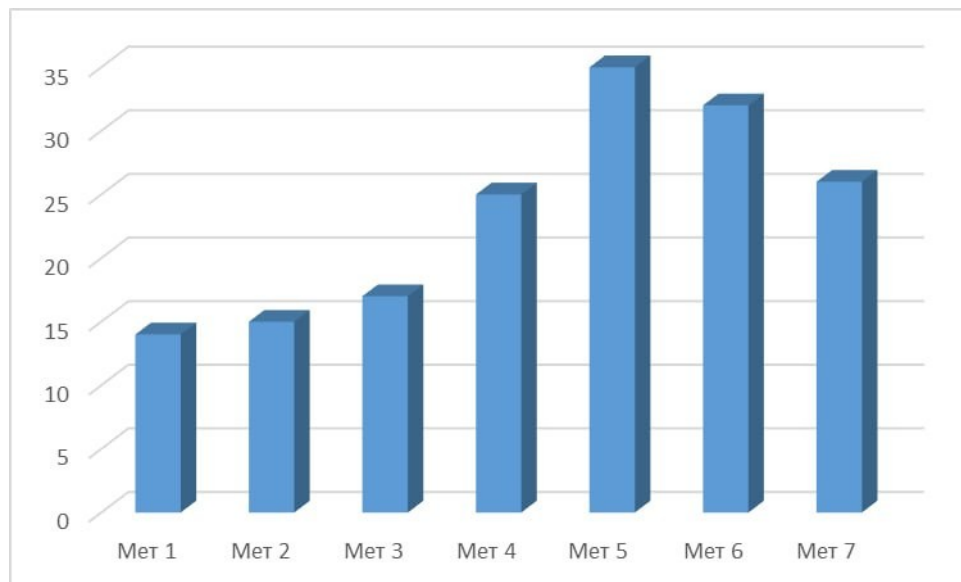


Рис 3.2.6. Графік залежності часу n-гептану аерозолю за всі проведені дослід у горизонтальній камері - Методики 1 – 7.

Вплив перегородок на процес поширення вогнегасного аерозолю у горизонтальному об'ємі є значним. Встановлено, що зі збільшенням ширини та кількості перешкод зростає час досягнення критичної концентрації аерозолю у зоні горіння, що безпосередньо впливає на тривалість гасіння пожежі. Наявність складної конфігурації перегородок спричиняє нерівномірний розподіл вогнегасного середовища, утворення застійних зон та уповільнення дифузійного і турбулентного перенесення вогнегасної речовини. Водночас при менших перешкодах та кращому газообміні спостерігалось швидше заповнення об'єму аерозолем і більш стабільне пригнічення процесу горіння. Отримані результати підтверджують необхідність врахування геометрії приміщень та характеру внутрішніх перешкод під час проєктування систем газового пожежогасіння.

Таблиця 3.2.5. Результати проведення дослідів з визначення часу гасіння при розділенні однією перегородкою різними розмірами у вертикальній камері.

Методика - 8,9 та 10.

Час	Мала перегородка	Середня перегородка	Велика перегородка
5 сек	Інтенсивне горіння	Інтенсивне горіння	Інтенсивне горіння
10 сек	8 сек - гасіння тигля	9 сек - гасіння тигля	Горіння

15 сек	-	-	Горіння
20 сек	-	-	16 сек - гасіння тигля

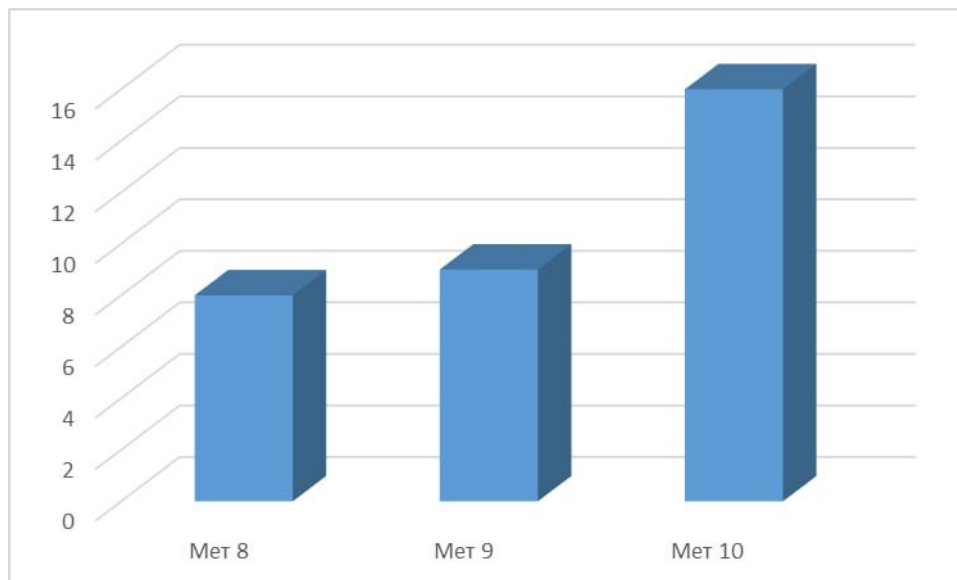


Рис 3.2.7. Графік залежності час гасіння н-гептану аерозолі та рівня розташування тигля у вертикальній камері - Методика - 8,9 та 10.

Таблиця 3.2.6. Ефективність гасіння аерозолем з різними перегородками виставлених у ряд у вертикальній камері. Методика - 11 та 12.

№	Перегородка : мала - середня - велика	Перегородка : велика - середня - мала
10 сек	Інтенсивне горіння	9 сек - гасіння першого тигля
15 сек	Горіння	17 сек - гасіння другого тигля
20 сек	24 сек - гасіння першого тигля	Горіння третього тигля
25 сек	28 сек - гасіння другого тигля	Гасіння третього тигля
30 сек	32 сек - гасіння третього тигля	-

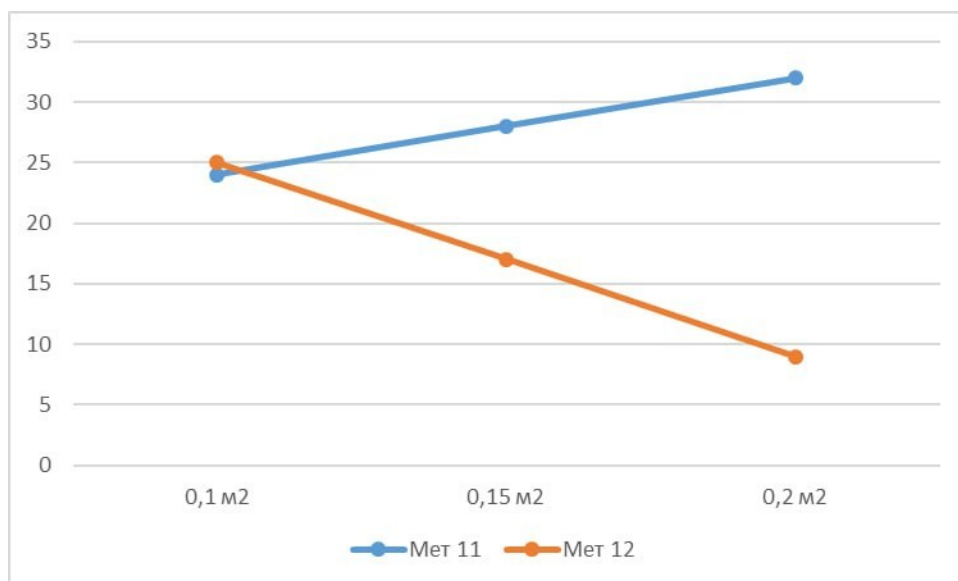


Рис 3.2.8. Графік залежності часу гасіння н-гептану аерозолі від площі трьох перегородок у вертикальній камері - Методика - 11 та 12.

Таблиця 3.2.7. Ефективність гасіння аерозолем з перегородками виставлених у шахматному порядку. Методика - 13 та 14.

Час	Від меншої до більшої	Від більшої до меншої
5 сек	8 сек - гасіння першого тигля	Інтенсивне горіння
10 сек	12 сек - гасіння другого тигля	Горіння
15 сек	Горіння третього тигля	
20 сек		
25 сек	Горіння третього тигля	28 сек - гасіння першого тигля
30 сек		Горіння другого та третього тигля
35 сек		36 сек - гасіння другого тигля

		39 сек - гасіння третього тигля
55 сек	Гасіння третього тигля	-

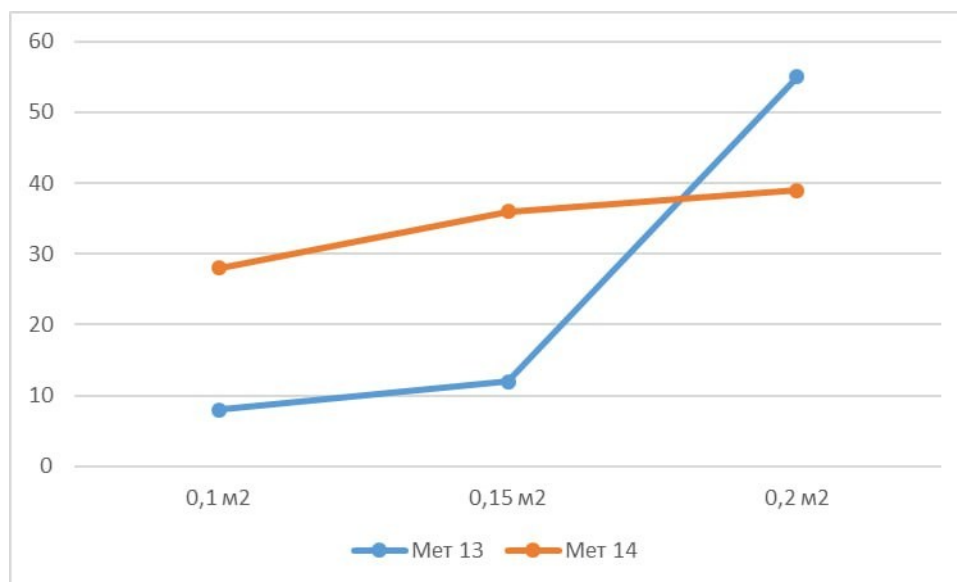


Рис 3.2.9. Графік залежності часу н-гептану аерозолі від площі трьох перегородок виставлених у шахматному порядку у вертикальній камері - Методика - 13 та 14.

Таблиця 3.2.8. Ефективність гасіння аерозолем з різними перегородками виставлених у ряд у вертикальній камері подача АУС зверху камери. Методика - 15 та 16.

№	Перегородка :	Перегородка :
	мала - середня - велика	велика - середня - мала
10 сек	6 сек - гасіння першого тигля	9 сек - гасіння першого тигля
15 сек	Подальше гасіння не	18 сек - гасіння другого тигля
20 сек	відбулось	Горіння третього тигля

25 сек		Горіння третього тигля
30 сек		Горіння третього тигля (гасіння не відбулось)

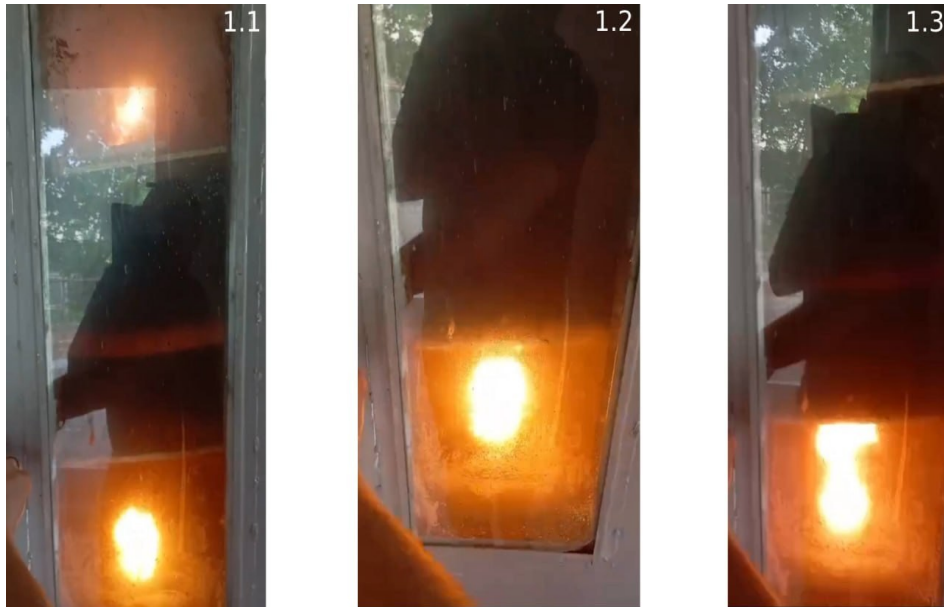


Рис. 3.2.10. Кінограма експерименту з визначення ефективності поширення аерозолі у вертикальній камері через три перегородки з більшої до меншої в кінці камери поз., (1.1. - початок експерименту; 1.2. - 10 секунда; 1.3. - 20 секунда).

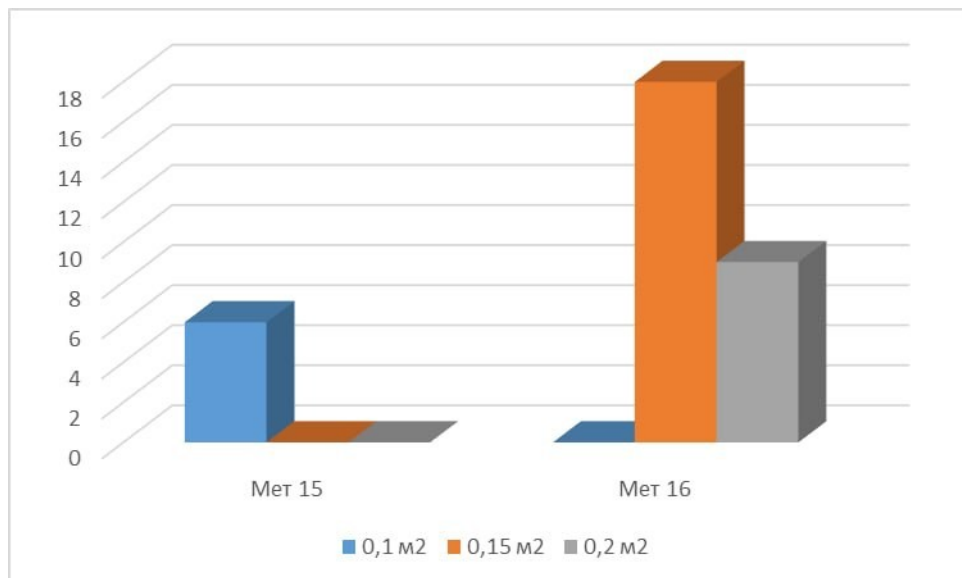


Рис 3.2.11. Графік залежності час гасіння н-гептану аерозолу та рівня розташування тигля у вертикальній камері - Методика 15 та 16.

Таблиця 3.2.9. Результати проведення дослідів з визначення часу гасіння при розділені перегородкою різними розмірами.

№	Вид вогнегасної речовини	Кількість та розмір перегородки і місце встановлення	Час гасіння тиглів с.	Примітка
1	Аерозоль	Одна мала перегородка 0,2*0,5м, посередині, біля стінки	1 тиг - 14 2 тиг - 12	Відбулось інтенсивне перемішування та розподілення аерозольної хмари в верхній частині.
2	Аерозоль	Одна середня перегородка 0,3*0,5м посередині, біля стінки	1 тиг - 11 2 тиг - 15	Спостерігалось інтенсивне перемішування та розподілення аерозолу навіть після гасіння.
3	Аерозоль	Одна велика перегородка 0,4*0,5м посередині, біля стінки	1 тиг - 7 2 тиг - 17	Спостерігалось менш інтенсивне перемішування розподілення аерозолу.
4	Аерозоль	Послідовно розташовані три перегородки від великої до малої	1 тиг - 18 2 тиг - 22 3 тиг - 25	Спостерігалось інтенсивне перемішування аерозолу через верхню частину приміщення навіть після гасіння.

5	Аерозоль	Послідовно розташовані три перегородки від малої до великої	1 тиг -7 2 тиг - 10 3 тиг - 35	Спостерігалось інтенсивне перемішування аерозолу через верхню частину приміщення. Після гасіння 2 тигля гасіння 3 тигля відбулось значно пізніше через 55 секунд.
6	Аерозоль	Три перегородки виставлені у шахматному порядку від меншої до більшої	1 тиг - 5 2 тиг - 10 3 тиг - 32	Спостерігалось інтенсивне перемішування аерозолу через верхню частину приміщення. Шахматне розташування перегородок від меншої до більшої забезпечило відносно швидке поширення аерозольної хмари — гасіння відбувалось послідовно з невеликими інтервалами між тиглями.
7	Аерозоль	Три перегородки виставлені у шахматному порядку від більшої до меншої	1 тиг -16 2 тиг - 21 3 тиг - 26	Спостерігалось інтенсивне перемішування аерозолу через верхню частину приміщення. Час гасіння тиглів був рівномірно розподілений між відсіками, що свідчить про стабільне послідовне проникнення аерозольної хмари через

				шахматно розташовані перегородки.
8	Аерозоль	У вертикальній камері одна мала перегородка 0,2*0,5м, посередині, біля стінки	1 тиг - 8	Спостерігалось швидке заповнення об'єму аерозолем завдяки конвективним потокам від вогнища. Мала перегородка не створювала суттєвого опору поширенню аерозолу у вертикальному об'ємі, що забезпечило швидке гасіння.
9	Аерозоль	У вертикальній камері одна середня перегородка 0,3*0,5м, посередині, біля стінки	1 тиг - 9	Спостерігалось поступове заповнення об'єму аерозолем. Середня перегородка дещо уповільнила поширення аерозольної хмари порівняно з малою, однак конвективні потоки сприяли її подоланню та формуванню вогнегасної концентрації.
10	Аерозоль	У вертикальній камері одна велика перегородка 0,4*0,5м, посередині, біля стінки	1 тиг - 16	Спостерігалось сповільнене поширення аерозолу через зменшення площі вільного перерізу. Велика перегородка суттєво обмежувала конвективне перенесення аерозольної

				хмари, що призвело до збільшення часу гасіння порівняно з малою та середньою перегородками.
11	Аерозоль	У вертикальній камері три зазначені перегородки встановлювались від більшої до меншої у сторону верхньої стінки камери	1 тиг - 24 2 тиг - 28 3 тиг - 32	Спостерігалось поступове проникнення аерозолю через перегородки завдяки висхідним конвективним потокам. Розташування від більшої до меншої перегородки у напрямку вгору створювало помірний опір, що забезпечило послідовне, але сповільнене гасіння всіх трьох тиглів.
12	Аерозоль	У вертикальній камері три зазначені перегородки встановлювались від меншої до більшої у сторону верхньої стінки камери	1 тиг - 9 2 тиг - 17 3 тиг - 25	Спостерігалось відносно швидке гасіння першого та другого тиглів завдяки меншому початковому опору перегородок. Найбільша верхня перегородка суттєво затримувала поширення аерозолю до третього тигля, проте конвективні потоки врешті забезпечили формування вогнегасної концентрації.

13	Аерозоль	У вертикальній камері три зазначені перегородки встановлювались у шахматному порядку від більшої до меншої у сторону верхньої стінки камери	1 тиг – 28 2 тиг - 36 3 тиг - 39	Спостерігалось значне сповільнення поширення аерозолу через складну шахматну конфігурацію перегородок. Великі початкові перегородки суттєво обмежували висхідний рух аерозольної хмари, що призвело до найдовшого часу гасіння серед усіх конфігурацій вертикальної камери.
14	Аерозоль	У вертикальній камері три зазначені перегородки встановлювались у шахматному порядку від меншої до більшої у сторону верхньої стінки камери	1 тиг - 8 2 тиг- 12 3 тиг - 55	Спостерігалось швидке гасіння першого тигля завдяки незначному початковому опору малої перегородки. Однак велика верхня перегородка у шахматному розташуванні практично повністю блокувала подальше поширення аерозолу, внаслідок чого гасіння другого та третього тиглів не відбулось протягом часу спостереження.
15	Аерозоль	У вертикальній камері три зазначені	1 тиг - 9 2 тиг- 18	Подача аерозолу зверху не забезпечила ефективного гасіння всіх тиглів. Перші

		перегородки встановлювались від більшої до меншої у сторону верхньої стінки камери	3 тиг –не загасив	два тиглі погасли відносно швидко завдяки безпосередній близькості до місця подачі, однак третій тигель не загасили через протидію конвективних потоків від вогнища, які перешкоджали проникненню аерозолю вниз.
16	Аерозоль	У вертикальній камері три зазначені перегородки встановлювались від меншої до більшої у сторону верхньої стінки камери	1 тиг - 6 2 тиг- не загасив 3 тиг –не загасив	Подача аерозолю зверху виявилась найменш ефективною конфігурацією. Гасіння відбулось лише для першого тигля, розташованого найближче до місця подачі. Другий та третій тиглі не загасили, оскільки висхідні конвективні потоки від вогнищ та зростаючі за розміром перегородки повністю блокували проникнення аерозольної хмари вниз.

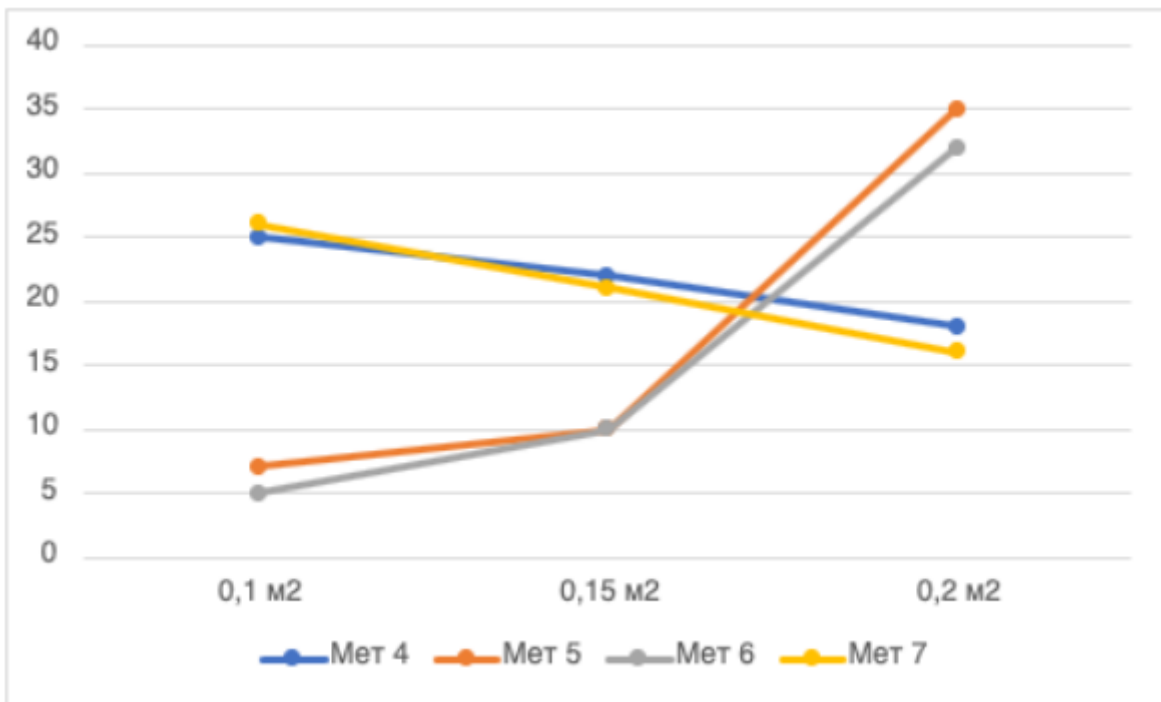


Рис 3.2.12. Графік залежностей від часу гасіння та площі отворів.

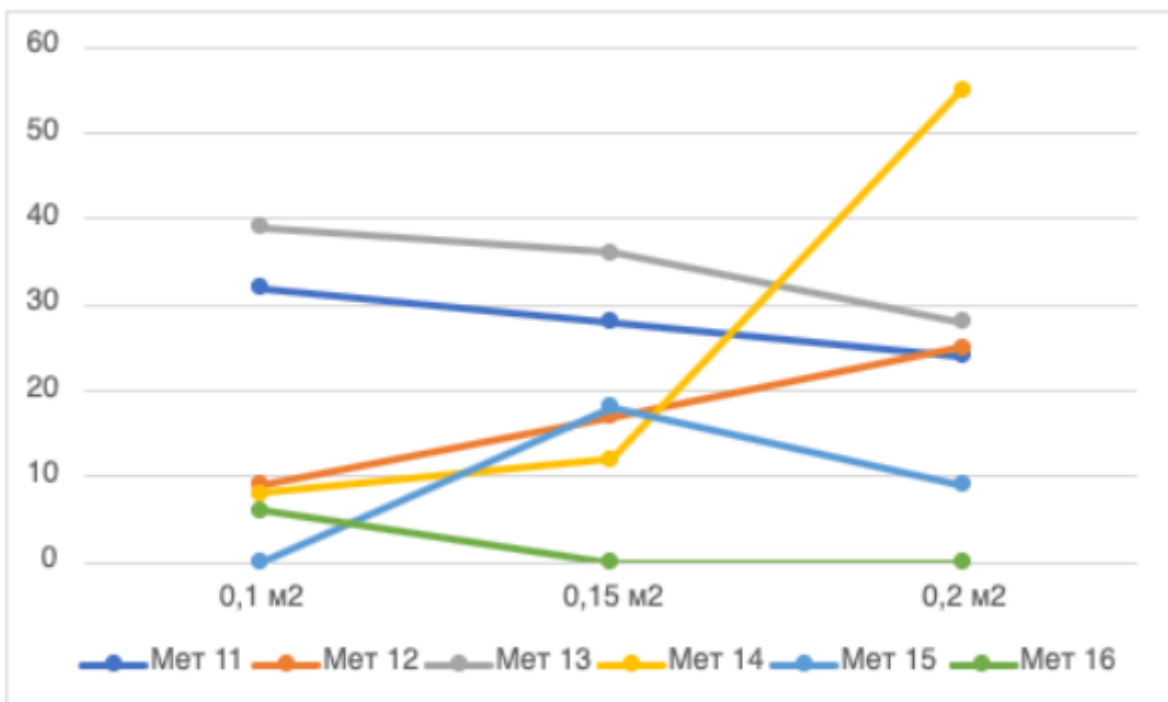


Рис 3.2.13. Графік залежностей від часу гасіння та площі отворів.

1. Горизонтальна камера. Аерозольна хмара поширюється переважно через верхню частину камери завдяки термічній конвекції від осередку горіння. Час гасіння суттєво залежить від площі перегородок та порядку їх розташування.

Найкоротший час гасіння всіх трьох тиглів (5–11–32 с) зафіксовано при шахматному розташуванні перегородок від меншої до більшої (дослід 6/6.1), що забезпечувало поступово зростаючий, але неперервний шлях для поширення аерозолі. Найгірший результат спостерігався при послідовному розташуванні від малої до великої перегородки (дослід 5/5.1) — час гасіння третього тигля становив 35–37 с із характерною затримкою понад 55 с після гасіння другого тигля. Конфігурація від більшої до меншої перегородки (дослід 4/4.1) забезпечила рівномірний розподіл часу гасіння (18–21–25 с), що свідчить про стабільне послідовне проникнення аерозолі.

2. Вертикальна камера. У вертикальному положенні камери аерозоль поширюється знизу вгору разом із конвективними потоками від вогнища. При розміщенні АУС знизу найефективнішою виявилась конфігурація з малою перегородкою (дослід 8/8.1) — час гасіння 7–8 с. Зі збільшенням площі перегородки час гасіння зростає: середня перегородка — 9 с (дослід 9/9.1), велика — 14–16 с (дослід 10/10.1). При трьох перегородках найкращий результат отримано при розташуванні від меншої до більшої (дослід 12/12.1): 9–17–25 с та 9–18–29 с; найгірший — при шахматному від більшої до меншої (дослід 13/13.1): 28–36–39 с та 28–36–40 с. При подачі АУС3 зверху (досліди 15–16) ефективність різко знижується через протидію конвективних потоків: у цих дослідах другий та третій тиглі не загасли, що свідчить про принципову важливість правильного вибору місця розташування вогнегасного засобу.

Результати дослідів свідчать про суттєву залежність ефективності гасіння від взаємного розташування джерела горіння та місця подачі вогнегасного аерозолі АУС у вертикальному об'ємі. У випадку, коли горіння відбувалося у верхній частині камери, а вогнегасний аерозоль подавався знизу, гасіння тигля відбулося через 19 секунд. Це пояснюється природним конвективним підйомом

аерозольних частинок разом з нагрітими газовими потоками від вогнища: висхідні теплові потоки сприяли активному перенесенню аерозолу вгору та забезпечили швидке формування вогнегасної концентрації в зоні горіння. Натомість, при подачі аерозолу зверху у разі розташування вогнища в нижній частині камери, гасіння не відбулося протягом усього часу спостереження. Основною причиною є протидія між напрямком подачі аерозолу (зверху вниз) та напрямком конвективних потоків, що формуються навколо вогнища (знизу вгору). Висхідні теплові потоки перешкоджали проникненню аерозольних частинок до нижньої зони горіння, утримуючи їх у верхніх шарах об'єму. Поширення вогнегасного аерозолу у вертикальному напрямку є складним багатофакторним процесом, на який впливають фізичні, аеродинамічні та конструктивні чинники. Одним із основних явищ, що гальмує підйом аерозолу вгору, є гравітаційне осідання частинок. Під дією сили тяжіння аерозольні частинки поступово випадають із повітряного середовища, що призводить до зниження концентрації вогнегасної речовини у верхніх шарах приміщення. Швидкість осідання суттєво залежить від розміру та густини частинок: зі збільшенням діаметра частинок інтенсивність осідання різко зростає [90]. Додатковим фактором, що погіршує вертикальне поширення аерозолу, є наявність перегородок, технологічного обладнання та інших конструктивних перешкод. Такі елементи змінюють структуру повітряних потоків, створюють локальні турбулентні зони та області застою повітря, у яких концентрація аерозолу може бути недостатньою для створення вогнегасного середовища. Внаслідок цього відбувається нерівномірний розподіл частинок по висоті приміщення. Важливу роль відіграє і турбулентне перемішування. Хоча турбулентність здатна покращувати перенесення аерозолу, вона одночасно може спричинити утворення локальних зон із підвищеною або зниженою концентрацією частинок. Це ускладнює формування стабільної вогнегасної концентрації у верхніх частинах об'єму [91]. Таким чином, основними явищами, що гальмують поширення аерозолу вгору, є гравітаційне осідання частинок, турбулентні неоднорідності потоків, осадження аерозолу на поверхнях та

наявність конструктивних перешкод у приміщенні. Сукупна дія цих факторів визначає швидкість формування вогнегасної концентрації та ефективність аерозольного пожежогасіння в умовах складної геометрії об'єму.

Ефективне поширення вогнегасного аерозолю у вертикальному об'ємі забезпечується за умови оптимального поєднання фізичних параметрів аерозольних частинок, характеристик повітряного середовища та конструктивних особливостей приміщення. Однією з основних умов є використання дрібнодисперсних частинок субмікронного діапазону, які характеризуються високим коефіцієнтом дифузії та малою швидкістю гравітаційного осідання. Такі частинки здатні тривалий час перебувати у завислому стані, забезпечуючи рівномірний розподіл вогнегасної речовини по всьому об'єму приміщення [82]. Ефективність поширення аерозолю також залежить від герметичності приміщення. Наявність інтенсивної вентиляції, відкритих прорізів або нещільностей призводить до передчасного видалення аерозолю з об'єму та унеможливорює досягнення необхідної вогнегасної концентрації. Умови обмеженого повітрообміну забезпечують тривале збереження аерозольної хмари та підвищують ефективність пожежогасіння [82].

3.3 Методика проведення експерименту з визначення ефективності поширення CO₂ та часу гасіння ним

Методика з визначення ефективності поширення CO₂ та часу гасіння ним полягає у наступному. В камері об'ємом 0.5 м³ розміром 2x0,5x0,5 м. встановлювались три рівних відсіки з перегородками з ДСП товщиною 10 мм та розмірами 1 - 0,5 x 0,2м; 2- 0,5x0,3м; 3- 0,5x0,4м. В кожному відсіку встановлювався тигель з н-гептаном об'ємом 100 мл.

Методика дослідження гасіння у вертикальній камері полягала у наступному. В вертикальній шафі встановлювали вогнища на одному рівні, Рівень А - 40 см, Рівень В - 80 см, Рівень С - 120 см, на рівні С встановлювалось вогнище. Запалювали тигель на рівні С та після 1 хвилини в нижній частині об'єму

забезпечували подавання вогнегасної речовини. Друге дослідження у вертикальній камері проводилось, на рівні А встановлювалось вогнище після чого запалювали тигель на рівні А та після 1 хвилини в верхній частині об'єму забезпечували подавання вогнегасної речовини. Фіксували час гасіння на відповідних рівнях.

Дослід з визначення ефективності поширення CO_2 та визначення часу створення вогнегасної концентрації в зазначеній камері проводився наступним чином. Спочатку одночасно підпалювали тиглі з н-гептаном та давався час на їх розгоряння 1хв. Далі після зазначеного часу закривали двері камери в крайньому відсіку та подавали відповідну кількість CO_2 . Фіксували час гасіння у першому, другому та третьому відсіках. Дані отримані в результаті експерименту наведені в таблицях. Система подачі CO_2 забезпечує введення вогнегасної речовини у робочий об'єм із заданою затримкою. Подача газу здійснюється через розподільний канал, що формує спрямований потік. Подальше спостереження за процесом здійснювалось протягом певного часу із фіксацією змін інтенсивності горіння, характеру полум'я та часу повного гасіння. Процедура проведення випробування ідентична до випробувань з АУС.

Результати проведення дослідів з визначення часу гасіння при розділені перегородкою у горизонтальній та вертикальній камері за допомогою діоксидом вуглецю CO_2 наведені у таблиці.

Табл. 3.3.1 Результати проведення дослідів з гасіння діоксидом вуглецю CO_2

№	Вид вогнегасної речовини	Кількість та розмір перегородки і місце встановлення	Час гасіння тиглів с.	Примітка
1	Діоксид вуглецю	Одна мала перегородка 0,2*0,5м, посередині, біля стінки	1 тиг - 32 2 тиг – 45	Спостерігалось інтенсивне перемішування та швидке поширення CO_2

				в об'ємі. Газ рівномірно заповнив обидва відсіки завдяки незначному опору перегородки.
2	Діоксид вуглецю	Одна середня перегородка 0,3*0,5м посередині, біля стінки	1 тиг – 36 2 тиг – 54	Спостерігалось інтенсивне перемішування CO ₂ , однак час гасіння суттєво зріс порівняно з малою перегородкою через збільшення опору поширенню газу.
3	Діоксид вуглецю	Одна велика перегородка 0,4*0,5м посередині, біля стінки	1 тиг - 29 2 тиг - 50	Спостерігалось сповільнене поширення CO ₂ через зменшення площі вільного перерізу. Формування вогнегасної концентрації у другому відсіку відбувалось із значною затримкою.
4	Діоксид вуглецю	Послідовно розташовані три від перегородки великої до малої	1 тиг - 29 2 тиг - 48 3 тиг - 62	Спостерігалось поступове проникнення CO ₂ через верхню частину приміщення. Краща конфігурація з трьох перегородок — газ поступово долав

				перешкоди зі зменшенням їх площі.
5	Діоксид вуглецю	Послідовно розташовані три перегородки від малої до великої	1 тиг - 15 2 тиг - 19 3 тиг - 26	Найгірше поширення CO ₂ серед усіх конфігурацій. Найбільша кінцева перегородка суттєво гальмувала накопичення газу у крайньому відсіку, гасіння протягом часу спостереження не завершилось.
6	Діоксид вуглецю	Три перегородки виставлені у шахматному порядку від меншої до більшої	1 тиг - 16 2 тиг - 21 3 тиг - 28	Спостерігалось поступове накопичення CO ₂ у відсіках. Шахматне розташування перегородок від меншої до більшої створювало зростаючий опір поширенню газу, що призвело до послідовного, але сповільненого гасіння тиглів.
7	Діоксид вуглецю	Три перегородки виставлені у	1 тиг - 31 2 тиг - 41 3 тиг - 49	Спостерігалось сповільнене поширення CO ₂ через складну

		шахматному порядку від більшої до меншої		шахматну конфігурацію. Великі початкові перегородки суттєво затримували надходження газу до суміжних відсіків, що проявилось у значних інтервалах між гасінням кожного наступного тигля.
8	Діоксид вуглецю	У вертикальній камері одна мала перегородка 0,2*0,5м, посередині, біля стінки	1 тиг - 16	Спостерігалось відносно повільне заповнення об'єму CO ₂ . Незважаючи на малий розмір перегородки, поширення газу у вертикальному об'ємі відбувалось повільніше порівняно з горизонтальною камерою через більшу густину CO ₂ та його тенденцію накопичуватись у нижніх зонах.
9	Діоксид вуглецю	У вертикальній камері одна середня перегородка 0,3*0,5м,	1 тиг – 19	Спостерігалось сповільнене поширення CO ₂ у вертикальному об'ємі. Середня

		посередині, біля стінки		перегородка у поєднанні з природним осіданням газу вниз призводила до нерівномірного розподілу концентрації CO ₂ , що дещо збільшило час гасіння порівняно з малою перегородкою.
10	Діоксид вуглецю	У вертикальній камері одна велика перегородка 0,4*0,5м, посередині, біля стінки	1 тиг – 21	Спостерігалось найповільніше поширення CO ₂ серед конфігурацій з однією перегородкою у вертикальній камері. Велика перегородка суттєво обмежувала переміщення газу між зонами, а тенденція CO ₂ до осідання додатково ускладнювала формування вогнегасної концентрації у зоні тигля.
11	Діоксид вуглецю	У вертикальній камері три зазначені перегородки	1 тиг - 36 2 тиг - 48	Спостерігалось поступове гасіння першого та другого

		встановлювались від більшої до меншої у сторону верхньої стінки камери	3 тиг - не загасило	тиглів, однак третій тигель не загасило протягом часу спостереження. Сукупний опір трьох перегородок та природне осідання CO ₂ вниз не дозволили сформувати вогнегасну концентрацію у верхній частині камери.
12	Діоксид вуглецю	У вертикальній камері три зазначені перегородки встановлювались від меншої до більшої у сторону верхньої стінки камери	1 тиг - 16 2 тиг - 45 3 тиг - 65	Спостерігалось послідовне гасіння всіх трьох тиглів із значними часовими інтервалами між ними. Наростаючий розмір перегородок поступово збільшував опір поширенню газу, однак достатній час спостереження дозволив CO ₂ досягти вогнегасної концентрації у всіх відсіках.
13	Діоксид вуглецю	У вертикальній камері три зазначені перегородки встановлювались у	1 тиг - 18 2 тиг - 42 3 тиг - не загасило	Спостерігалось гасіння першого та другого тиглів із значними часовими інтервалами,

		шахматному порядку від більшої до меншої у сторону верхньої стінки камери		третій тигель не загасив. Шахматне розташування великих перегородок створювало складний лабіринтний шлях для поширення CO ₂ вгору, що у поєднанні з природним осіданням газу унеможливило формування вогнегасної концентрації у верхній зоні.
14	Діоксид вуглецю	У вертикальній камері три зазначені перегородки встановлювались у шахматному порядку від меншої до більшої у сторону верхньої стінки камери	1 тиг - 14 2 тиг - не загасло 3 тиг - не загасило	Спостерігалось гасіння лише першого тигля. Шахматне розташування зі зростаючою площею перегородок у поєднанні з більшою густиною CO ₂ порівняно з повітрям повністю унеможливило поширення газу до другого та третього тиглів — гасіння їх не відбулось протягом

				усього спостереження.	часу
--	--	--	--	--------------------------	------



Рис. 3.3.1. Кінограма експерименту з визначення ефективності поширення діоксиду вуглецю CO_2 через 1 перегородку (1.1 - початок експерименту; 1.2. – 120 секунда; 1.3. - 140 секунда).



Рис. 3.3.2. Кінограма експерименту з визначення ефективності поширення діоксиду вуглецю CO_2 через три перегородки з більшої до меншої в кінці камери поз., (1.1. - початок експерименту 1.2 – 150 секунда 1.3 – 180 секунда).

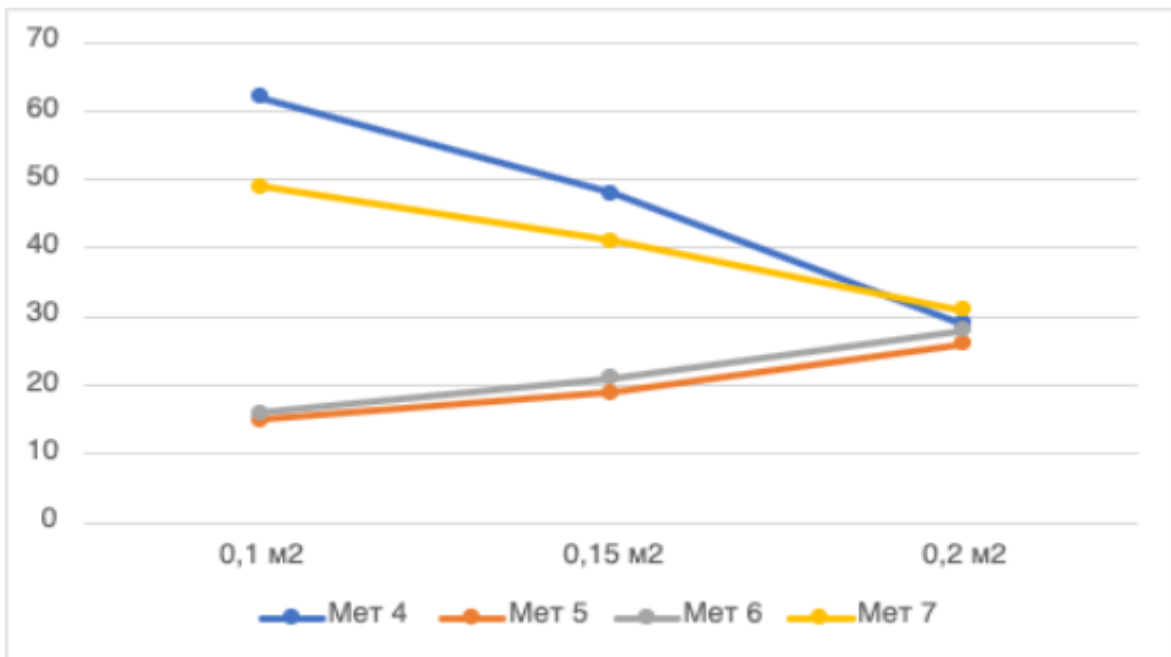


Рис 3.3.4. Графік залежностей від часу гасіння та площі отворів.

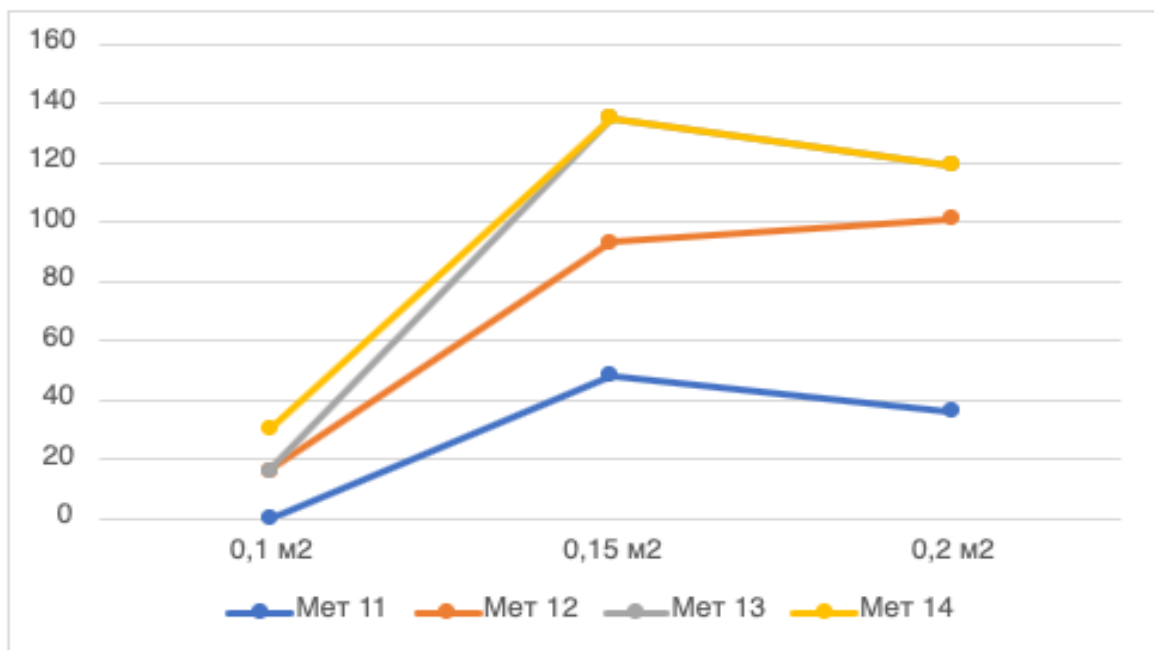


Рис 3.3.5. Графік залежностей від часу гасіння та площі отворів.

Висновки за результатами дослідження діоксиду вуглецю (CO₂)

1. Горизонтальна камера. Діоксид вуглецю, маючи густину, більшу за повітря (1,96 кг/м³), поширюється переважно у нижній частині камери та через нижні зазори між перегородками і підлогою. Час гасіння при використанні CO₂ значно

перевищує відповідні показники для аерозолі: при одній малій перегородці — 32–52 с (проти 6–12 с для аерозолі). Найефективнішою конфігурацією виявилось послідовне розташування перегородок від великої до малої (дослід 4/4.1): 25–29 с, 46–48 с, 62–64 с — газ поступово долав перешкоди зі зменшенням їх площі. Найгіршою конфігурацією стало шахматне розташування від більшої до меншої (дослід 7/7.1): 31–34 с, 41–46 с, 49–53 с. При розташуванні від малої до великої (дослід 5/5.1) отримано найшвидше гасіння перших двох тиглів (15–19 с), однак третій тигель загасав значно пізніше (26 с), що підтверджує домінуючий вплив найбільшої кінцевої перегородки.

2. Вертикальна камера. Вертикальне розташування камери є найбільш несприятливим для застосування CO_2 через природне осідання газу вниз, що суперечить необхідності досягнення вогнегасної концентрації у верхніх відсіках. При одній перегородці час гасіння зростає зі збільшенням її площі: мала — 14–16 с, середня — 18–19 с, велика — 20–21 с (досліди 8–10). При трьох перегородках, розташованих від більшої до меншої (дослід 11/11.1) та у шахматних конфігураціях (досліди 13/13.1 та 14/14.1), другий і третій тиглі не загасили — CO_2 не зміг подолати сукупний опір перегородок і власну тенденцію до осідання. Лише конфігурація від меншої до більшої (дослід 12/12.1) забезпечила гасіння всіх трьох тиглів (16–45–65 с та 18–46–62 с), однак із значними часовими інтервалами.

Зі збільшенням площі перегородки час гасіння тигля значно зростає. При малій перегородці ($0,2 \times 0,5$ м) гасіння відбулось найшвидше — через 70 секунд, що пояснюється відносно вільним проходженням газу через широкий переріз та інтенсивним перемішуванням CO_2 в обох відсіках. При середній перегородці ($0,3 \times 0,5$ м) час гасіння зріс до 140 секунд, оскільки зменшення площі вільного перерізу уповільнило надходження газу до другого відсіку та сповільнило

накопичення вогнегасної концентрації. Найгірший результат зафіксовано при великій перегородці (0,4×0,5 м) — гасіння відбулось лише через 160 секунд, що обумовлено мінімальною площею вільного перерізу та, відповідно, максимальним опором поширенню CO₂, отримані результати підтверджують, що діоксид вуглецю, на відміну від вогнегасного аерозолу, поширюється у замкненому об'ємі значно повільніше через більшу густину та переважно дифузійний характер перенесення. Геометричні параметри перегородок є визначальним фактором при формуванні вогнегасної концентрації CO₂ у суміжних відсіках, що необхідно враховувати при проектуванні систем об'ємного газового пожежогасіння. При використанні трьох послідовно розташованих перегородок ефективність поширення діоксиду вуглецю суттєво знижується незалежно від порядку їх розташування. В обох конфігураціях — як від малої до великої, так і від великої до малої — гасіння всіх тиглів відбулось практично одночасно в діапазоні 176–180 секунд. Це свідчить про те, що за наявності трьох перегородок порядок їх розташування не має визначального впливу на кінцевий результат гасіння, на відміну від випадку з однією перегородкою, де розмір перерізу відігравав вирішальну роль. Основною причиною настільки тривалого часу гасіння є сукупний опір трьох перегородок, який суттєво уповільнює поширення CO₂ між відсіками та затримує формування вогнегасної концентрації у віддалених зонах об'єму. Газ накопичувався переважно в першому відсіку, поступово дифундуючи через вузькі перерізи до наступних, що і зумовило значну затримку гасіння. Порівняно з аерозолем, який при аналогічних конфігураціях забезпечував гасіння протягом 25–55 секунд, діоксид вуглецю виявився значно менш ефективним в умовах складної геометрії з кількома перешкодами, застосування CO₂ у приміщеннях з розгалуженою системою внутрішніх перегородок потребує збільшення кількості точок подачі газу або підвищення інтенсивності його подачі для забезпечення своєчасного формування вогнегасної концентрації в усьому захищуваному об'ємі.

Аерозоль АУС демонструє суттєво вищу ефективність гасіння порівняно з діоксидом вуглецю в усіх досліджених конфігураціях геометрично складних

обмежених об'ємів. Середній час гасіння при використанні аерозолі у горизонтальній камері з однією перегородкою становив 6–23 с, тоді як для CO₂ — 29–56 с, тобто у 2–4 рази більше. Принципова різниця полягає у механізмі поширення: аерозоль переміщується разом із конвективними потоками і здатний долати складніші геометричні перешкоди, тоді як CO₂ гравітаційно осідає і не поширюється у верхні зони вертикальної камери. У вертикальній камері при складних конфігураціях перегородок CO₂ виявився неефективним — не забезпечив гасіння всіх вогнищ, тоді як аерозоль у більшості конфігурацій забезпечував повне гасіння. На підставі отриманих результатів при проектуванні систем об'ємного пожежогасіння у геометрично складних обмежених об'ємах рекомендується: надавати перевагу аерозольним системам перед вуглекислотними при наявності внутрішніх перегородок, особливо у вертикально орієнтованих об'єктах; розміщувати джерело подачі аерозолі внизу об'єкту для використання природної конвекції; уникати конфігурацій, у яких найбільша перегородка розташована у напрямку поширення вогнегасного засобу; при шахматному розташуванні перегородок надавати перевагу конфігурації від меншої до більшої у напрямку поширення засобу.

3.4 Явища які гальмують поширення газу вгору

Поширення газових вогнегасних речовин у вертикальному напрямку залежить від комплексу фізичних та аеродинамічних процесів, які можуть суттєво уповільнювати формування необхідної вогнегасної концентрації у верхніх частинах приміщення. Окремі підходи щодо підвищення ефективності об'ємного пожежогасіння розглянуто у розділі монографії здобувача [92]. Одним із основних факторів, що гальмує поширення газу вгору, є різниця густини газових середовищ. У випадку використання вуглекислого газу (CO₂), густина якого є більшою за густину повітря, газ має тенденцію накопичуватися у нижніх частинах об'єму, що ускладнює його природне підняття до верхніх рівнів приміщення. Унаслідок цього формування однорідної концентрації CO₂ у всьому

об'ємі відбувається повільніше [45]. Суттєвий вплив має також наявність перегородок та конструктивних перешкод, які змінюють напрямок руху газового потоку та створюють локальні області застою. У складних об'ємно-планувальних структурах приміщення газ поширюється нерівномірно, а окремі зони можуть залишатися недостатньо заповненими вогнегасною речовиною [93]. Крім того, поширення газу вгору може уповільнюватися через недостатню інтенсивність конвективних потоків. За відсутності значного тепловиділення або природної циркуляції повітря процес перенесення CO₂ у верхні частини об'єму відбувається переважно за рахунок дифузії, яка характеризується значно меншою швидкістю [94]. Ефективне поширення газових вогнегасних речовин у вертикальному напрямку забезпечується за умов формування стійкого масообміну між нижніми та верхніми зонами приміщення. Однією з ключових умов є створення достатнього надлишкового тиску під час подачі газу, що забезпечує примусове переміщення вогнегасної речовини у верхні частини об'єму навіть за наявності конструктивних перешкод. Висока швидкість подачі CO₂ сприяє інтенсивнішому проникненню газу через прорізи та міжперегородкові простори [45]. Важливе значення має раціональне розташування точок подачі газу. Розміщення випускних насадків у нижній частині приміщення або поблизу вертикальних каналів сприяє формуванню висхідного потоку та покращує рівномірність розподілу вогнегасної речовини по висоті. У складних за геометрією приміщеннях ефективність поширення суттєво зростає при використанні декількох точок подачі газу [93]. Також підвищує ефективність поширення газу мінімізація застійних зон та оптимізація внутрішньої геометрії приміщення. Відсутність надмірної кількості вузьких проходів, глухих кутів та великих перегородок забезпечує більш рівномірне переміщення газових потоків і зменшує втрати концентрації у віддалених ділянках об'єму [95]. Додатково важливою умовою є обмеження інтенсивного повітрообміну із зовнішнім середовищем. Закриті дверні прорізи, відключення вентиляційних систем та герметичність приміщення дозволяють зберігати необхідну концентрацію вогнегасного газу протягом достатнього часу для

повного припинення горіння. [94]. Слід зазначити, що об'ємне пожежогасіння є одним із ефективних методів ліквідації пожеж у замкнутих або умовно герметичних приміщеннях. Суть цього способу полягає у заповненні всього об'єму захищеного приміщення вогнегасною речовиною до концентрації, за якої припиняється процес горіння. Як вогнегасний агент у таких системах широко застосовується Carbon Dioxide (CO_2) — газ, що не підтримує горіння та характеризується хімічною інертністю відносно більшості горючих речовин [94]. Ефективність гасіння пожежі вуглекислим газом зумовлена передусім зниженням концентрації кисню в повітряному середовищі. За нормальних атмосферних умов частка кисню в повітрі становить приблизно 20,9 %, однак для підтримання більшості процесів горіння необхідна його концентрація не нижче 15–16 %. Під час подачі CO_2 у приміщення відбувається розбавлення повітряної суміші, що призводить до зменшення концентрації кисню до критичних значень. У таких умовах реакції окиснення стають нестійкими або повністю припиняються, що спричиняє згасання полум'я [50]. Важливою особливістю застосування вуглекислого газу є також його охолоджувальна дія. Під час виходу зі зрідженого стану CO_2 інтенсивно розширюється, що супроводжується різким зниженням температури. Частина газу при цьому переходить у тверду фазу — так званий сухий лід із температурою приблизно $-78,5$ °C. Такий процес сприяє додатковому охолодженню зони горіння та зменшенню тепловиділення в осередку пожежі [93]. Крім того, вуглекислий газ впливає на перебіг реакцій горіння шляхом розбавлення газової фази полум'я. Потрапляючи у зону горіння, CO_2 знижує концентрацію активних реагентів — горючих газів та кисню, що призводить до зменшення швидкості хімічних реакцій окиснення. У результаті створюється газове середовище, в якому подальше поширення полум'я стає неможливим [93]. Об'ємне пожежогасіння із застосуванням CO_2 використовується переважно у приміщеннях, де необхідно забезпечити швидке припинення горіння без пошкодження обладнання або матеріальних цінностей. До таких об'єктів належать електротехнічні приміщення, серверні кімнати, архіви, машинні відділення, трансформаторні підстанції та інші технологічні

об'єкти, де використання води або пінних засобів пожежогасіння є небажаним [96]. У результаті проведеного дослідження процесу об'ємного пожежогасіння встановлено, що ефективність застосування газових вогнегасних речовин, зокрема вуглекислий газ, визначається не лише їх фізико-хімічними властивостями, але й умовами поширення у захищуваному об'ємі, включаючи геометрію приміщення та наявність перешкод. Встановлено, що формування необхідної вогнегасної концентрації є складним просторово-часовим процесом, який залежить від інтенсивності подачі газу та характеру його перемішування у середовищі [94]. Встановлено, що визначальним фактором ефективного гасіння є швидкість досягнення критичної концентрації вогнегасної речовини у зоні горіння. При цьому часовий інтервал формування однорідного газового середовища має вирішальне значення, оскільки саме в цей період відбувається пригнічення хімічних реакцій окиснення та зниження інтенсивності тепловиділення. Крім того, встановлено, що введення CO_2 у середовище призводить до зниження швидкості поширення полум'я та зміни його структури [45]. Зі збільшенням концентрації вуглекислого газу відбувається уповільнення розвитку полум'я та зменшення інтенсивності тепловиділення, що підтверджує ефективність інертних газів у процесах пожежогасіння навіть за наявності перешкод у середовищі [95]. Аналогічні висновки наведені у дослідженнях, присвячених моделюванню процесів пожежогасіння у замкнутих об'ємах [45].

3.5. Моделювання ефективності пожежогасіння об'ємними вогнегасними засобами в великих об'ємах.

Математичне моделювання процесу розповсюдження вогнегасних засобів базується на системі рівнянь, що описують адвективно-дифузійний транспорт речовини з урахуванням фізичних ефектів: гравітаційного осадження частинок аерозолі, молекулярної та турбулентної дифузії, конвективних потоків від вогнища, а також геометричних обмежень, що накладаються конфігурацією приміщення та розташуванням перегородок.

Для однокамерної системи основу моделі складає одновимірне рівняння адвекції-дифузії з урахуванням осадження:

$$\partial C/\partial t + v_z \cdot \partial C/\partial z + u_s \cdot \partial C/\partial z = D \cdot \partial^2 C/\partial z^2 + S(z,t) \quad (3.5.1)$$

де $C(z,t)$ – концентрація агента [$\text{г}/\text{м}^3$]; z – вертикальна координата [м]; t – час [с]; v_z – вертикальна швидкість адвекції [$\text{м}/\text{с}$]; u_s – швидкість осадження [$\text{м}/\text{с}$]; D – коефіцієнт молекулярної дифузії [$\text{м}^2/\text{с}$]; $S(z,t)$ – джерельний член [$\text{г}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$].

Для складніших систем з багатьма компартментами застосовується система звичайних диференціальних рівнянь (ЗДР) першого порядку для кожного об'єму:

$$dC_i/dt = (\dot{m}_{in,i} - \dot{m}_{out,i})/V_i - \lambda_i \cdot C_i + S_{i(t)} \quad (3.5.2)$$

де C_i – концентрація у компартменту i [$\text{г}/\text{м}^3$]; $\dot{m}_{in,i}$, $\dot{m}_{out,i}$ – масові потоки входження та виходження агента [$\text{кг}/\text{с}$]; V_i – об'єм компартменту [м^3]; λ_i – коефіцієнт втрат (осадження, дифузія через стінки) [с^{-1}]; $S_{i(t)}$ – джерело агента у компартменту [$\text{кг}/\text{с}$].

3.5.1 Фізичні параметри вогнегасних агентів

Розроблена модель враховує властивості двох основних типів об'ємних систем пожежогасіння: аерозольних (на прикладі АУС) та газових (діоксид вуглецю). Ключові фізичні параметри наведені у таблиці 3.5.1.

Таблиця 3.5.1 – Фізичні параметри вогнегасних засобів

Параметр	Аерозоль (АУС)	Діоксид вуглецю (CO ₂)
Діаметр частинок	0,5 мкм	— (молекулярний газ)
Мінімальна гасіння концентрація (МГС)	50 г/м ³	140 г/м ³ (≈7% об.)
Коефіцієнт дифузії (при 20°C)	2×10 ⁻⁵ м ² /с	1,6×10 ⁻⁵ м ² /с
Швидкість осадження (за Стоксом)	~10 ⁻⁵ м/с	-0,05 м/с (сідає вниз)
Час утримання концентрації	600 с (10 хв)	300 с (5 хв)
Щільність речовини	0,05 кг/м ³	1,98 кг/м ³ (при 0°C)

Аерозольні частинки завдяки малому діаметру (0,5 мкм) виявляють надзвичайно низку швидкість осадження (близько 10^{-5} м/с), що дозволяє їм залишатися в повітрі впродовж 10 хвилин навіть за відсутності вертикальних потоків. На противагу цьому, CO_2 з щільністю майже вдвічі більшою за повітря ($1,98$ проти $1,225$ кг/м³) виявляє явне гравітаційне сідання з швидкістю $-0,05$ м/с, що суттєво ускладнює його розповсюдження у вертикальному напрямку, особливо у великих об'ємах зі складною геометрією.

3.5.2 Перенесення вогнегасного агента між суміжними відсіками

Коли приміщення розділене на кілька суміжних об'ємів, агент потрапляє з одного відсіку до іншого двома шляхами одночасно. Перший — молекулярна дифузія, тобто природне вирівнювання концентрації за рахунок різниці її значень по обидва боки отвору. Другий — адвективне перетікання, спричинене різницею тиску між відсіками. Сумарний масовий потік зручно описати поєднанням закону Фіка для дифузійної складової та рівняння витікання через отвір для напірної:

$$\dot{m}_{\text{диф}} = D \cdot A \cdot (C_1 - C_2) / \Delta z ; \quad \dot{m}_{\text{миск}} = C_d \cdot A \cdot \sqrt{(2 \cdot \Delta P / \rho_{\text{пов}})} \quad (3.5.3-3.5.4)$$

де D — коефіцієнт дифузії агента, м²/с; A — площа отвору між відсіками, м²; C_1, C_2 — концентрації агента у сусідніх відсіках, г/м³; Δz — характерна відстань перенесення, м; C_d — коефіцієнт витрати отвору; ΔP — перепад тиску, Па; $\rho_{\text{пов}}$ — густина повітря, кг/м³.

Для аерозольних частинок важливо врахувати ще один процес — їх поступове осідання під дією сили тяжіння. Швидкість осадження визначається за формулою Стокса:

$$u_{\text{ос}} = d_{\text{ч}}^2 \cdot (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{пов}}) \cdot g / (18 \cdot \mu) \approx 1 \times 10^{-5} \text{ м/с} \quad (3.5.5)$$

де $d_{\text{ч}}$ — діаметр частинки, м; $\rho_{\text{ч}}$ — густина матеріалу частинки, кг/м³; μ — динамічна в'язкість повітря, Па·с. Отриманий результат має принципове

значення: завдяки малому розміру частинок (близько 0,5 мкм) аерозоль осідає вкрай повільно і фактично залишається завислим у повітрі впродовж десятків хвилин. Натомість діоксид вуглецю, маючи густину майже вдвічі більшу за повітря, навпаки активно опускається вниз ($u_{oc,CO_2} \approx -0,05$ м/с), віддаляючись від верхніх осередків горіння. Саме ця відмінність у поведінці двох агентів пояснює більшість розбіжностей, які спостерігаються далі в розрахунках.

3.5.3 Модель однокамерної системи

Найпростіший випадок — однорідне приміщення без внутрішніх перегородок. Для нього час досягнення мінімальної вогнегасної концентрації (МВК) зручно подати як добуток базового часу та кількох поправкових коефіцієнтів, кожен з яких відповідає за окремий фізичний чинник:

$$t_{реал} = t_{баз} \cdot K_{напр} \cdot K_{отв} \cdot K_{ос} \cdot K_{конв} \quad (3.5.6)$$

де $t_{баз}$ — час досягнення МВК в ідеальних умовах (відкритий об'єм, рівномірне заповнення); $K_{напр}$ враховує напрям подачі агента; $K_{отв}$ — ступінь перекриття отворів; $K_{ос}$ — осідання частинок; $K_{конв}$ — конвективні потоки від вогнища. Розраховані за цією моделлю значення часу для камери об'ємом 0,5 м³ наведено в таблиці 3.5.2.

Таблиця 3.5.2 – Час досягнення МВК у однокамерній системі (об'єм 0,5м³)

Площа отвору, м ²	АУС, с	СО ₂ , с
0,020 (малий)	3,7	17,6
0,050 (малий)	2,1	10,1
0,100 (нормальний)	2,1	10,1
0,150 (великий)	1,4	6,6
0,250 (дуже великий)	1,4	6,6

Дані таблиці показують, що за однакових умов діоксиду вуглецю потрібно у 5–8 разів більше часу, ніж аерозолі. Наочно цю різницю ілюструє рисунок 3.5.1.

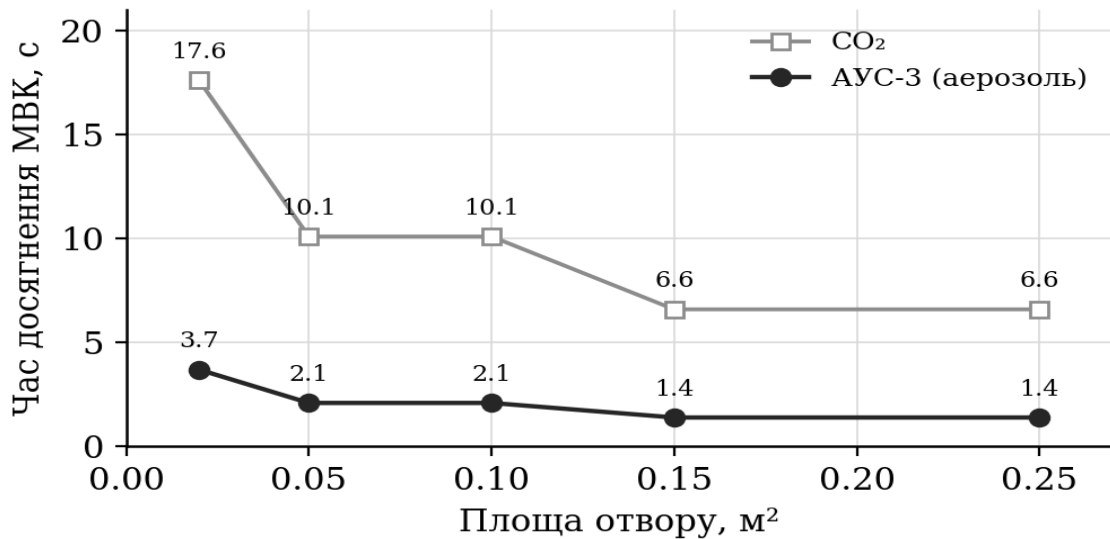


Рисунок 3.5.1 – Вплив площі отвору на час досягнення МВК для аерозолі та CO₂

При малих отворах (менше 0,05 м²) аерозоль досягає МВК за 3,7 с, тоді як діоксиду вуглецю на це потрібно 17,6 с — різниця майже у п'ять разів. У всьому розглянутому діапазоні аерозоль зберігає виразну перевагу. Визначальним геометричним параметром тут є відношення площі отворів до площі підлоги (aperture ratio). За результатами розрахунків встановлено коефіцієнти затримки, наведені в таблиці 3.5.3.

Таблиця 3.5.3 – Коефіцієнти затримки $K_{отв}$ для різних діапазонів

Діапазон	Характер перекриття	$K_{отв}$
< 0,05	Сильно перекрите (малі отвори)	3,5
0,05–0,15	Помірно перекрите	2,0
0,15–0,30	Слабко перекрите	1,3
> 0,30	Відкрите (великі отвори)	1,0

Коефіцієнт $K_{отв}$ показує, у скільки разів час гасіння більший, ніж у відкритому об'ємі. Цю залежність унаочнює рисунок 3.5.2.

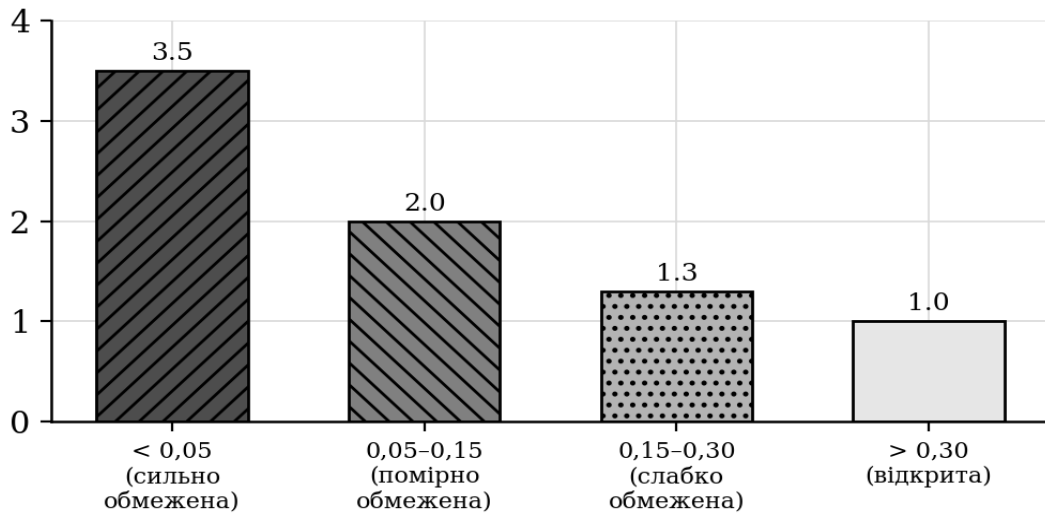


Рисунок 3.5.2 – Коефіцієнти затримки для різних діапазонів

Видно, що за умови коли сильно перекрита конфігурація менше 0,05 час гасіння зростає у 3,5 рази. Для систем пожежогасіння це критична затримка: якщо базовий час становить 2 секунди, то за малих отворів він збільшується до 7 секунд. Помітно впливає на час досягнення МВК і напрям подачі агента. Розглянуто три типові варіанти: знизу вгору (з нижніх точок приміщення), вбоки (з середніх висот у горизонтальному напрямку) та згори вниз (з верхніх точок). Відповідні коефіцієнти наведено в таблиці 3.5.4.

Таблиця 3.5.4 – Коефіцієнти затримки $K_{напр}$ для різних напрямків подачі

Напрямок подачі	$K_{напр}$	Фізичне пояснення
Знизу вгору	1,0	Конвекція від вогнища сприяє поширенню
Вбоки	1,5	Конвекція діє менш ефективно
Згори вниз	2,5	Гравітація протидіє поширенню

Ці дані переконливо показують, наскільки важливо правильно обрати напрям подачі. Детальне порівняння трьох сценаріїв подано на рисунку 3.5.3.

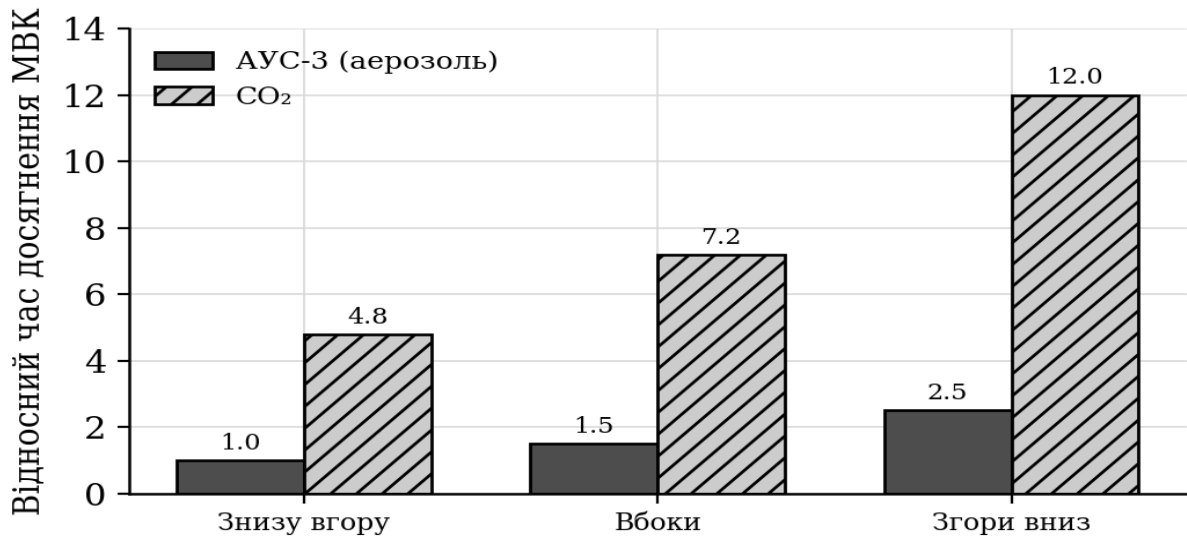


Рисунок 3.5.3 – Вплив напрямку подачі на час досягнення МВК

Подача знизу вгору виявляється найефективнішою для обох агентів. Подача вбоки дає затримку у 1,5 раза, а згори вниз — у 2,5 раза. Для діоксиду вуглецю ці значення ще відчутніші: при подачі знизу йому потрібно близько 10 секунд, а при подачі згори — уже 25 секунд.

Для приміщень із внутрішніми перегородками застосовується модель послідовного заповнення відсіків. Агент має спочатку наповнити перший відсік, далі продифундувати крізь отвір до другого і так далі. Сумарний час визначається як сума по всіх відсіках:

$$t_{заг} = \sum [t_i \cdot K_{отв,i} \cdot K_{диф,i}] \quad (3.5.7)$$

де t_i — час заповнення i -го відсіку, с; $K_{отв,i}$, $K_{диф,i}$ — коефіцієнти затримки відповідно через площу отвору та дифузійний опір на ділянці. Час досягнення МВК зростає лавиноподібно зі збільшенням кількості відсіків. Цей ефект демонструє рисунок 3.5.4 на прикладі системи з п'яти послідовних камер.

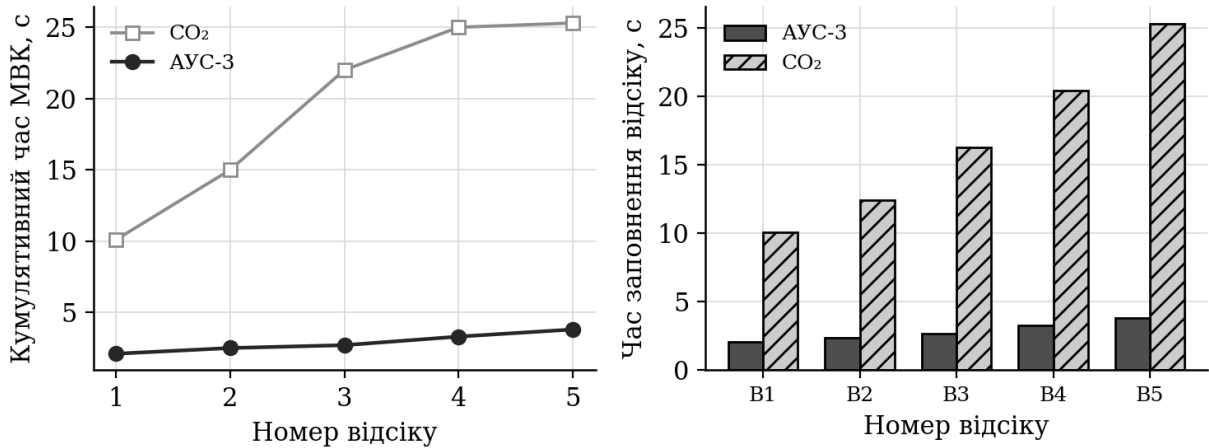


Рисунок 3.5.4 – Послідовне заповнення відсіків: кумулятивний час та час для кожного окремого відсіку

Для третього відсіку аерозолі потрібно 2,7 с (проти 2,1 с для першого), а діоксиду вуглецю — 16,3 с (проти 10,1 с для першого). Сумарно для п'яти відсіків аерозоль досягає МВК за 3,8 с, тоді як CO₂ — аж за 25,3 с. Це наочно підтверджує стрімке зростання часу та вирішальну роль конфігурації отворів. Ефективну швидкість поширення агента можна оцінити за формулою:

$$v_{\text{еф}} = v_{\text{баз}} \cdot K_{\text{отв}} \cdot K_{\text{вис}} \cdot K_{\text{вогн}} \quad (3.5.8)$$

де $v_{\text{баз}}$ — базова швидкість у відкритому просторі (для аерозолі 0,15 м/с, для CO₂ 0,05 м/с). Коефіцієнти залежать від площі отворів (0,3–1,2), висоти поширення (0,85–1,0 для аерозолі) та інтенсивності вогнища (1,0–1,6).

3.5.4 Порівняльний аналіз ефективності аерозолі та CO₂

Чи не найважливіший підсумок моделювання — кількісне підтвердження переваг аерозолі. Зведене порівняння за всіма розглянутими сценаріями подано на рисунку 3.5.5.

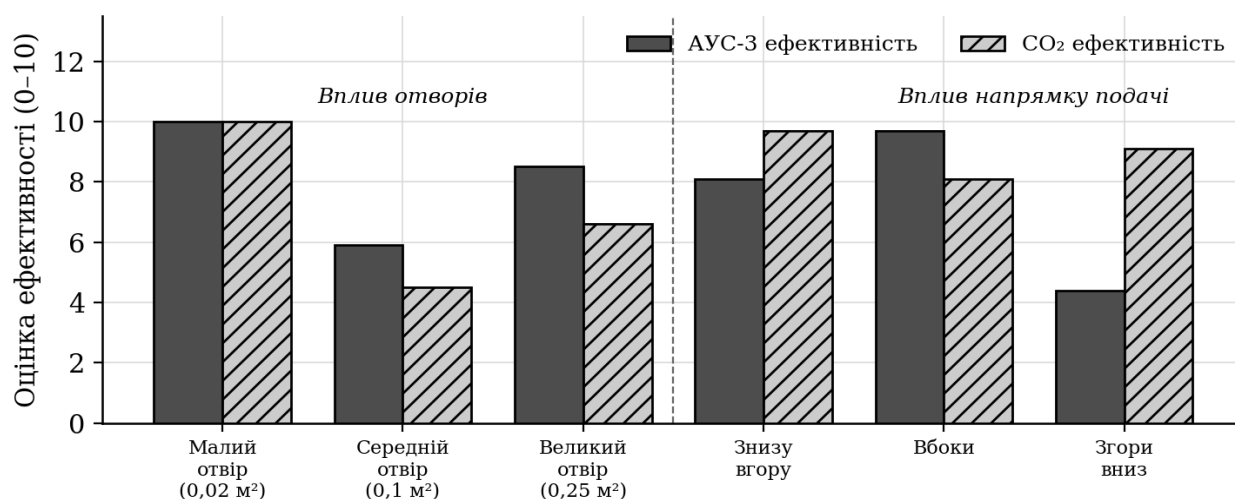


Рисунок 3.5.5 – Порівняння ефективності аерозолі (АУС-3) та CO₂ за всіма сценаріями

Аерозоль переважає діоксид вуглецю практично в усіх сценаріях. Навіть за найнесприятливішої комбінації — малих отворів і подачі згори вниз — він залишається відчутно ефективнішим. Кількісні показники зведено в таблиці 3.5.5.

Таблиця 3.5.5 – Порівняння ефективності АУС та CO₂

Показник	АУС	CO ₂
Час до МВК (однокамерна, 0,5 м ³)	2,1 с	10,1 с (4,8×)
Коефіцієнт гравітаційного впливу	1,05	1,80
Ефективність вертикальної подачі	висока	низька
Залежність від aperture ratio	слабка	сильна

Динаміку наростання концентрації для трьох напрямів подачі ілюструє рисунок 3.5.6.

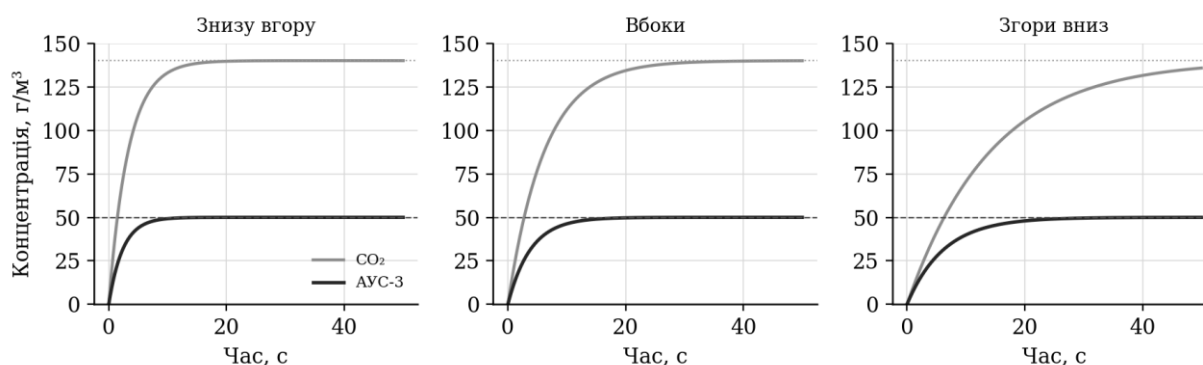


Рисунок 3.5.6 – Наростання концентрації вогнегасних агентів у часі для трьох сценаріїв подачі

Графіки підтверджують: при подачі знизу вгору обидва агенти виходять на МВК найшвидше; при подачі вбоки затримка вже помітна; при подачі згори вниз діоксид вуглецю наростає значно повільніше. Зокрема, у сценарії подачі знизу аерозоль досягає 50 г/м^3 приблизно за 3,5 с, тоді як CO_2 виходить на свої 140 г/м^3 лише за 10 с.

На основі розробленої моделі та виконаних розрахунків сформульовано такі практичні рекомендації.

Для великих об'ємів (понад 1000 м^3) доцільно передбачати кілька точок подачі (3–5 розподільників) замість однієї центральної, а площу отворів між вертикальними зонами підтримувати на рівні не менше 10–15 % від площі підлоги. Для систем на CO_2 подачу слід збільшувати на 30–50 % порівняно з аерозольними та встановлювати датчики концентрації в найменш доступних ділянках приміщення.

Щодо напрямку подачі: варіант знизу вгору найефективніший ($K = 1,0$), подача вбоки — прийнятна альтернатива ($K = 1,5$), а подача згори вниз для CO_2 не рекомендується ($K = 2,5$ і більше).

Слід також враховувати температурні та вентиляційні чинники. Під час пожежі температура сягає $400\text{--}1000 \text{ }^\circ\text{C}$, і потужні конвективні потоки сприяють поширенню агента, особливо при нижній подачі. Вентиляція може як допомагати, так і заважати дифузії — залежно від напрямку потоків; при механічній вентиляції на час подачі агента вентилятори рекомендується вимикати.

3.6 Кількісні закономірності впливу площі та конфігурації перегородок на час досягнення вогнегасної концентрації

Статистичне опрацювання результатів натурних експериментів (методики 1–16, таблиці 3.2.1–3.2.9, рисунки 3.2.2–3.2.13) дозволило встановити кількісні закономірності впливу геометричних параметрів перегородок на час гасіння. Для горизонтальної камери з однією перегородкою залежність часу гасіння другого тигля від площі перегородки S_n в дослідженому діапазоні 0,10–0,20 м² з високою точністю апроксимується лінійною функцією:

$$t_{AVC}(I) = 7,2 + 50 \cdot S_n, \quad R^2 = 0,99, \quad (3.7.1)$$

де $t_{AVC}(I)$ — час гасіння аерозолем при одній перегородці, с; S_n — площа перегородки, м². Для діоксиду вуглецю за результатами дослідів у тих самих конфігураціях (таблиця 4.3.3) отримано:

$$t_{CO_2}(I) = 40 + 50 \cdot S_n. \quad (3.7.2)$$

Зіставлення залежностей (3.7.1) і (3.7.2) показує, що кутовий коефіцієнт (≈ 50 с/м²) для обох агентів практично однаковий, тобто абсолютний приріст часу гасіння від збільшення площі перегородки визначається аеродинамікою перетікання через отвір і слабо залежить від типу агента. Принципова відмінність полягає у вільному члені (7,2 с проти 40 с), який відображає базовий час формування вогнегасної концентрації: для CO₂ він у 5,5 раза більший, що зумовлено дифузійним характером поширення газу та його гравітаційним осіданням.

Залежність часу досягнення мінімальної вогнегасної концентрації (МВК) від площі отвору між відсіками $A_{отв}$ (за даними таблиці 3.5.2 для камери об'ємом 0,5 м³) описується степеневою функцією виду:

$$t_{AVC} = 0,76 \cdot A_{отв}^{-0,39}, \quad R^2 = 0,92; \quad (3.7.3)$$

$$t_{CO_2} = 3,59 \cdot A_{отв}^{-0,39}, \quad R^2 = 0,93. \quad (3.7.4)$$

Однаковий показник степеня (–0,39) свідчить про подібність механізму впливу площі отвору на обидва агенти, а відношення коефіцієнтів $3,59/0,76 \approx 4,7$ кількісно характеризує сталу перевагу аерозолю над CO₂ за швидкістю досягнення МВК, яка не залежить від площі отвору.

Вплив конфігурації (кількості та взаємного розташування) перегородок узагальнено безрозмірним коефіцієнтом конфігурації $k_{\text{конф}}$, що визначається як відношення часу гасіння найвіддаленішого тигля у багатоперегородковій конфігурації до часу гасіння при одній малій перегородці:

$$t_n = t_1 \cdot k_{\text{конф}}. \quad (3.7.5)$$

Значення коефіцієнта $k_{\text{конф}}$, отримані за експериментальними даними ($t_1 = 12$ с), наведено в таблиці 3.7.1.

Таблиця 3.7.1 – Коефіцієнти конфігурації перегородок за результатами експериментів

Конфігурація перегородок	К конф	Час гасіння останнього тигля, с
Одна перегородка (0,10–0,20 м ²)	1,0–1,4	12–17
Три перегородки у ряд, від більшої до меншої	2,1	25
Три перегородки у ряд, від меншої до більшої	2,9	35
Шахматна конфігурація з наростаючою площею	4,6	55–59
Вертикальна камера, три перегородки	до 6,88	залежно від рівня тигля

Об'єднання залежностей (3.7.1) і (3.7.5) з коефіцієнтом напрямку подачі $K_{\text{напр}}$ (1,0 — подача знизу; 1,5 — збоку; 2,5 і більше — зверху, п. 3.5.3) дає узагальнену емпіричну модель часу гасіння у приміщенні зі складною геометрією:

$$t = (7,2 + 50 \cdot \bar{S}_n) \cdot k_{\text{конф}} \cdot K_{\text{напр}} \leq t_{\text{норм}}, \quad (3.7.6)$$

де \bar{S}_n — середня площа перегородок у конфігурації, м²; $t_{\text{норм}}$ — нормативно допустимий час гасіння (прийнято $t_{\text{норм}} = 60$ с). Розв'язання нерівності (3.7.6) відносно \bar{S}_n дозволяє визначити граничні геометричні параметри відсіків:

$$\bar{S}_{п,гран} = [t_{норм} / (k_{конф} \cdot K_{напр}) - 7,2] / 50. \quad (3.7.7)$$

За формулою (3.7.7) для аерозольних систем при подачі знизу ($K_{напр} = 1,0$) граничні значення становлять: для конфігурації трьох перегородок у ряд від більшої до меншої — $\bar{S}_{п,гран} \approx 0,43 \text{ м}^2$; від меншої до більшої — $\approx 0,27 \text{ м}^2$; для шахматної конфігурації — $\approx 0,12 \text{ м}^2$, що відповідає перекриттю не більше $\sim 50 \%$ площі поперечного перерізу (коефіцієнт прохідності $\beta = A_{отв} / A_{пер} \geq 0,5$). Для діоксиду вуглецю аналогічний розрахунок за залежністю (3.7.2) дає $\bar{S}_{п,гран} \approx 0,40 \text{ м}^2$ лише за умови однієї перегородки ($k_{конф} = 1$); уже при $k_{конф} \geq 1,5$ нормативний час не забезпечується за жодної площі перегородки, що кількісно підтверджує непридатність CO_2 -систем для приміщень із двома і більше перегородками без збільшення подачі агента на 30–50 % або застосування кількох точок випуску.

Таким чином, встановлені залежності (3.7.1)–(3.7.7) дозволяють на етапі проектування за відомими геометричними параметрами приміщення (середньою площею перегородок, конфігурацією їх розташування та напрямом подачі агента) прогнозувати час гасіння і перевіряти його відповідність нормативно допустимому, а також обґрунтовано обирати тип вогнегасного агента. Граничними геометричними умовами ефективного об'ємного аерозольного пожежогасіння в межах нормативного часу слід вважати: перекриття перегородками не більше 50 % поперечного перерізу для шахматних конфігурацій, площу отворів між суміжними зонами не менше 10–15 % площі підлоги ($\text{aperture ratio} \geq 0,15$) та подачу агента знизу або збоку об'єму.

Висновки до розділу 3

Складність поширення аерозолі в об'ємних приміщеннях зумовлена тим, що реальні пожежні умови у приміщеннях характеризуються складною геометрією, що включає перегородки, меблі, дверні прорізи тощо. Ці фактори суттєво впливають на розподіл аерозолі, ускладнюючи процес гасіння, що підтверджує необхідність застосування математичного моделювання для

прогнозування поведінки аерозолію. Переваги дрібнодисперсних вогнегасних аерозолів полягає у тому, що аерозолі з розміром частинок у діапазоні 0,05–1 мкм забезпечують більш ефективне поширення у захищуваних об'ємах порівняно з традиційними порошковими вогнегасниками. Вогнегасні аерозолі мають потенціал для застосування у складних інфраструктурних об'єктах, таких як трансформатори, завдяки їх здатності швидко й рівномірно заповнювати об'єм. Вплив площі та розташування перегородок на час гасіння, встановлений під час проведення експериментальних досліджень показав, що з ростом площі перегородки час гасіння першого тигля зменшується, а другого — збільшується. Найдовший час гасіння (до 55 секунд) спостерігався при послідовному розташуванні перегородок від меншої до більшої площі, що ілюструє ускладнене поширення аерозолію в такій конфігурації. Інтенсивність перемішування аерозольної хмари вказує на те, як активне перемішування аерозолію у верхній частині камери сприяло більш рівномірному розподілу, що позитивно впливає на швидкість досягнення вогнегасної концентрації. Обмеження поширення аерозолію при великих перегородках зумовлене тим, що найбільші перегородки виступали як бар'єри які унеможлилювали швидке поширення аерозолію, що у свою чергу призводило до збільшення часу гасіння наступних тиглів і загального зниження ефективності системи.

Практична значущість розробленої методики, полягає у тому, що запропонована методика імітації поширення аерозолію у камері з різними за розміром перегородками дозволяє визначити ефективність систем пожежогасіння на основі аерозолів, що сприяє вдосконаленню нормативно-технічних моделей випробувань.

Розроблена комплексна математична модель дозволяє прогнозувати час розповсюдження вогнегасних агентів у приміщеннях зі складною геометрією з урахуванням напрямку подачі, конфігурації отворів, гравітаційних ефектів та конвекції від вогнища. Аерозольні системи демонструють суттєву перевагу над газовими (у 3–7 разів більшу швидкість) в умовах багатокімнатних об'єктів. Це обумовлено мінімальним осадженням та вищою мобільністю частинок. Площа

отворів є критичним параметром: при aperture ratio $< 0,05$ час гасіння зростає у 3,5 разів. Оптимальна площа отворів повинна складати 10–15% від площі підлоги. Напрямок подачі впливає на час гасіння у 2,5 разів (у найгіршому випадку при подачі згори вниз). Найбільш ефективною є подача знизу вгору. Розроблена модель може застосовуватися при проектуванні систем пожежогасіння для об'єктів критичної інфраструктури, дата-центрів, складів та інших великих закритих просторів.

Розділ 4. Нормативно-технічне вдосконалення та практичне впровадження результатів досліджень

4.1. Пропозиції щодо встановлення вогнегасних засобів аерозольного пожежогасіння.

На основі проведених експериментальних досліджень процесів поширення аерозольних вогнегасних речовин у замкнутих об'ємах встановлено, що одним із перспективних напрямків підвищення ефективності аерозольного пожежогасіння є зміна підходу до розташування генераторів вогнегасного аерозолю у приміщенні. Отримані результати показали, що традиційне верхнє встановлення генераторів не завжди забезпечує рівномірний розподіл аерозольної хмари, особливо у приміщеннях складної геометрії, за наявності перегородок, технологічного обладнання або значної висоти об'єму [89]. Під час проведених дослідів було встановлено, що при розміщенні генераторів у верхній частині приміщення значна частина аерозольної суміші накопичується у верхніх шарах об'єму, тоді як у нижніх та віддалених ділянках можуть формуватись локальні зони зі зниженою концентрацією вогнегасної речовини. Це пов'язано з особливостями аеродинаміки аерозольних потоків, процесами турбулентного перемішування та осідання частинок під дією сили тяжіння. Як зазначається у роботах [97], дрібнодисперсні частинки аерозолю мають складну траєкторію руху у замкнутих об'ємах, а їх розподіл значною мірою залежить від напрямку подачі та конфігурації приміщення. Крім того, результати експериментів показали, що ефективність системи суттєво підвищується при встановленні генераторів у кутових частинах приміщення [89]. Це пояснюється тим, що саме у кутах та поблизу огорожувальних конструкцій найчастіше утворюються застійні зони, у яких швидкість руху повітря є мінімальною. За верхнього центрального розташування генераторів проникнення аерозолю у такі області є обмеженим, що може призводити до локального збереження горіння або повторного займання. Розміщення генераторів по кутах дозволяє зменшити нерівномірність розподілу аерозолю та покращити заповнення важкодоступних зон приміщення [99]. Додатковою перевагою нижнього та кутового розміщення

є зменшення впливу гравітаційного осідання частинок. При подачі аерозолі зверху частинки швидше осідають на горизонтальні поверхні, що призводить до втрати активної концентрації у нижніх рівнях приміщення. Натомість при нижньому встановленні генераторів аерозольні частинки довше перебувають у завислому стані та проходять більший шлях через увесь об'єм приміщення. Це підтверджується дослідженнями у сфері аерозольної динаміки та багатофазних потоків [100, 101]. Також доцільність такого технічного рішення підтверджується сучасними підходами до CFD-моделювання пожежогасіння [102]. У різних наукових роботах встановлено, що розташування джерел подачі вогнегасної речовини суттєво впливає на швидкість формування ефективної концентрації та рівномірність розподілу агентів у приміщенні. Використання нижнього розташування генераторів дозволяє зменшити кількість «мертвих зон» та покращити циркуляцію аерозольної хмари у складних за геометрією об'ємах. [103, 104]. У зв'язку з отриманими результатами доцільно рекомендувати внесення змін до нормативно-технічної документації щодо проектування аерозольних систем пожежогасіння. Зокрема, пропонується:

- передбачити переважне встановлення генераторів аерозольного пожежогасіння у нижній частині приміщень;
- рекомендувати розташування генераторів у кутових зонах та поблизу потенційних застійних областей;
- враховувати напрямки конвективних потоків під час проектування систем;
- впровадити вимоги щодо перевірки рівномірності розподілу аерозолі у приміщеннях складної геометрії.

Реалізація зазначених рекомендацій дозволить підвищити ефективність аерозольного пожежогасіння.

4.1.1. Шляхи вдосконалення нормативно-технічного забезпечення з урахуванням експериментальних досліджень.

Досягнення та інтеграції вимог пожежної безпеки в процес цифрового планування вимагає об'єднання різноманітних та розкиданих регуляторних знань, пов'язаних з пожежною безпекою. Характер того, як вимоги формулюються та описуються в нормативних актах, часто не має вичерпного та детального опису один одного. Інтерпретація складних взаємозв'язків з цих джерел вимагає досвіду фахівців [105].

На основі проведених експериментальних досліджень процесів поширення аерозольних та газових вогнегасних речовин з різними перегородками, а також аналізу чинної нормативної бази, встановлено, що підвищення ефективності нормативно-технічного забезпечення повинно бути спрямоване не лише на оновлення вимог, але й на їх адаптацію до реальних фізичних процесів, що відбуваються під час пожежогасіння [106]. Першочерговим напрямком вдосконалення є впровадження у нормативні документи вимог щодо врахування просторової нерівномірності розподілу вогнегасних речовин [107]. Проведені дослідження показали, що як для аерозолів, так і для газових агентів, наявність перегородок за різним розташуванням та обмежених прорізів суттєво впливає на час гасіння та формування ефективної концентрації. У зв'язку з цим доцільно нормативно закріпити обов'язкове врахування геометрії приміщення, площі прорізів та висоти об'єму при проектуванні систем пожежогасіння [108], що узгоджується з підходами міжнародних стандартів ISO 14520 [65] та EN 15004 [66]. Другим важливим напрямком є удосконалення методик вогневих випробувань. На підставі отриманих експериментальних результатів доцільно доповнити стандартні випробування вимогами щодо:

1. оцінювання часу досягнення вогнегасної концентрації у різних по висоті точках приміщення;
2. контролю рівномірності розподілу агента у присутності перешкод;
3. врахування вертикального розшарування середовища.

Це дозволить наблизити лабораторні випробування до реальних умов експлуатації та підвищити достовірність оцінки ефективності систем.

Третім напрямком вдосконалення є впровадження обов'язкового контролю герметичності приміщень та часу утримання концентрації (hold time). Проведені дослідження підтвердили, що навіть за достатньої початкової подачі вогнегасної речовини ефективність гасіння може знижуватися через витіки або нерівномірний розподіл. У зв'язку з цим доцільно розширити застосування методів типу *Enclosure Integrity Test* та адаптувати їх до аерозольних систем, що наразі недостатньо регламентовано. Наступним важливим кроком є інтеграція чисельного моделювання (CFD) у нормативну практику. Експериментальні результати показали значну залежність процесу гасіння від конвективних потоків, турбулентності та геометрії об'єму, що складно повністю відтворити у стандартних випробуваннях. Використання програмних комплексів, таких як Fire Dynamics Simulator (FDS), дозволяє прогнозувати розподіл вогнегасних агентів та оптимізувати параметри систем ще на етапі проєктування [108]. Крім того, доцільним та основним є встановлення диференційованих нормативних вимог для різних типів вогнегасних систем (газових, аерозольних, порошкових) з урахуванням їх фізичних особливостей [109]. Зокрема, для аерозольних систем необхідно враховувати процеси осідання частинок, а для газових - вплив різниці густини та умов подачі, що підтверджується сучасними дослідженнями в галузі аерозольної динаміки та пожежної безпеки [97]. Завершальним напрямком вдосконалення є гармонізація національної нормативної бази з міжнародними стандартами із одночасною адаптацією до національних умов експлуатації. Це передбачає не лише формальне впровадження стандартів ISO та EN, але й їх доповнення результатами вітчизняних експериментальних досліджень, що дозволить створити більш точну та ефективну систему нормативного регулювання. Процес створення нормативної системи має починатись ще і до етапів будівництва. Все частіше застосовується цілісний підхід до розуміння будівель [110], який приймає розуміння того факту, що будівлі впливають на навколишнє середовище різними способами протягом усього їх життєвого

циклу. Вимога до протипожежних дверей до сходових кліток, нова вимога щодо димової герметичності. Газові системи протипожежного захисту забезпечують швидке, чисте придушення та тривалий захист завдяки тривалому процесу утримання газу, проте це не завжди спрацьовує. Також існує заборона до повторного використання цих елементів. Підсумовуючи, існує кілька перешкод, які можуть бути актуальними щодо вимог пожежної безпеки, пов'язаних з повторно використаними продуктами. Зміни вимог з часом підкреслюють необхідність знати вік продукту або матеріалу, про який йде мова, історичний розвиток будівельного кодексу та те, як попередні вимоги можна порівняти з поточними, тобто чи можна очікувати, що продукти, протестовані для попередніх класів пожежної безпеки, відповідатимуть вимогам нових класів пожежної безпеки. Це підкреслює необхідність вивчення будівельними органами впливу на майбутнє повторне використання при оцінці нових вимог до продуктів та матеріалів [111].

4.2. Оцінка нормативно-правових механізмів імплементації змін

Ефективне впровадження вдосконаленої системи нормативно-технічного забезпечення у сфері пожежної безпеки потребує створення дієвого механізму нормативно-правової імплементації змін. Проведений аналіз чинної нормативної бази та результати експериментальних досліджень показали, що існуюча система технічного регулювання в Україні потребує адаптації до сучасних наукових підходів, міжнародних стандартів та реальних умов експлуатації систем пожежогасіння.

Одним із ключових напрямків імплементації є гармонізація національних стандартів із міжнародними нормативними документами, зокрема ISO 14520 [65], EN 15004 [66], EN 15276 [69] та NFPA 2001[67]. Проведені експериментальні дослідження підтвердили необхідність врахування таких параметрів, як просторовий розподіл вогнегасної речовини, вплив перегородок, герметичність приміщення та час утримання вогнегасної концентрації. У

міжнародних стандартах ці показники вже використовуються як обов'язкові критерії оцінювання ефективності систем, тоді як у вітчизняній нормативній базі вони регламентовані частково або відсутні. У межах імплементації змін доцільним є внесення змін до національних ДСТУ та галузевих нормативних документів, які регламентують проєктування, випробування та сертифікацію систем пожежогасіння. Зокрема, необхідним є:

- введення вимог щодо оцінювання рівномірності розподілу вогнегасної речовини;
- нормативне закріплення контролю концентрації агента у різних точках об'єму;
- врахування впливу висоти приміщення та внутрішніх перешкод;
- впровадження критеріїв оцінки повторного займання після завершення подачі агента.

Результати проведених досліджень показали, що ефективність аерозольних та газових систем суттєво змінюється залежно від геометрії приміщення та площі прорізів між відсіками. У зв'язку з цим доцільним є запровадження нормативної вимоги щодо обов'язкового проведення розрахунків або моделювання поширення вогнегасних речовин для складних об'єктів. У міжнародній практиці для цього широко використовуються CFD-моделі, зокрема Fire Dynamics Simulator (FDS), які дозволяють прогнозувати розподіл агентів у реальних умовах пожежі [106, 108].

Важливим елементом імплементації є також удосконалення процедур сертифікації та оцінки відповідності. На сьогодні сертифікація окремих систем ґрунтується переважно на результатах типових лабораторних випробувань, які не завжди враховують особливості реальної експлуатації. У зв'язку з цим доцільно впровадити багаторівневу систему оцінювання, яка включатиме:

- лабораторні випробування;
- напівнатурні випробування;

- комп'ютерне моделювання;
- перевірку ефективності в умовах реальних або наближених до реальних об'ємів.

Окремого значення набуває створення механізму регулярного оновлення нормативної бази. Проведений аналіз показав, що розвиток технологій пожежогасіння відбувається значно швидше, ніж оновлення нормативних документів. У зв'язку з цим доцільно впровадити систему періодичного перегляду стандартів із залученням наукових установ, випробувальних лабораторій та профільних фахівців ДСНС України.

Для ефективної реалізації запропонованих змін необхідним є також розширення взаємодії між науковими установами, органами технічного регулювання та виробниками систем пожежогасіння. Отримані під час експериментів результати повинні використовуватись не лише у наукових дослідженнях, але й безпосередньо під час розроблення нових нормативних вимог та методик випробувань.

4.3. Пропозиції щодо змін у нормативних документах

На основі проведених експериментів у приміщеннях із перегородками та різною конфігурацією внутрішнього простору встановлено, що чинні вимоги ДСТУ EN 15276-1:2021 [58] недостатньо враховують вплив геометрії приміщення, розташування генераторів та наявності застійних зон на ефективність аерозольного пожежогасіння, встановлено, що зі збільшенням кількості перегородок та їх ширини зростає час досягнення критичної вогнегасної концентрації, а також можливе формування локальних зон, які недостатньо заповненні аерозолем. Найбільша ефективність поширення аерозолу спостерігалась при забезпеченні вільного переміщенні аерозольної хмари у приміщенні та розташування джерел подачі у нижній частині приміщення. Пропонуємо доповнити:

Таблиця 4.3.1. Порівняльна таблиця чинних та запропонованих пропозицій щодо змін у ДСТУ EN 15276-1:2021 [58].

Розділ / Положення	Чинне формулювання (ДСТУ EN 15276-1:2021)	Пропоноване формулювання
Розділ щодо проектування систем	Відсутні вимоги щодо розташування генераторів залежно від геометрії приміщення. Не враховується вплив перегородок, висоти об'єму та наявності застійних зон на ефективність розподілу аерозолі.	Під час проектування систем аерозольного пожежогасіння у приміщеннях складної геометрії, з перегородками або значною висотою об'єму розташування генераторів повинно забезпечувати рівномірне поширення аерозолі. Рекомендується встановлення генераторів у нижній частині приміщення та поблизу кутових зон з метою зменшення утворення застійних областей і покращення вертикального поширення аерозолі.
Додаток А: Методика випробувань	Стандартні вимоги до випробувань не передбачають оцінювання рівномірності розподілу аерозолі у різних точках приміщення, зокрема у кутових зонах, за перегородками та в областях з ускладненим повітрообміном.	Під час випробувань систем аерозольного пожежогасіння необхідно оцінювати рівномірність розподілу аерозолі у різних по висоті та конфігурації точках приміщення, включаючи кутові зони, простір за перегородками та ділянки з ускладненим повітрообміном.
Коефіцієнт впливу перешкод	Відсутній коригувальний коефіцієнт, що враховує вплив внутрішніх	Для приміщень із внутрішніми перегородками, технологічним обладнанням або складною

	перегородок, технологічного обладнання або складної конфігурації приміщення на швидкість поширення аерозолю та час досягнення вогнегасної концентрації.	конфігурацією повинні застосовуватись коригувальні коефіцієнти, що враховують вплив перешкод на швидкість поширення аерозолю та час досягнення вогнегасної концентрації.
CFD-моделювання	Відсутні вимоги щодо проведення комп'ютерного моделювання для об'єктів із складною просторовою конфігурацією. Оцінка ефективності ґрунтується виключно на типових лабораторних випробуваннях.	Для об'єктів зі складною просторовою конфігурацією або значною кількістю перешкод рекомендується виконання CFD-моделювання процесу поширення вогнегасного аерозолю з метою підтвердження ефективності проєктних рішень та визначення оптимального розташування генераторів.
Вимоги щодо реальних умов експлуатації	Чинні вимоги не передбачають врахування змін планування приміщення після введення системи в експлуатацію, переplanування, зміни конфігурації перегородок та інших факторів, що впливають на процес поширення аерозолю.	Під час оцінювання ефективності систем повинні враховуватись зміни повітрообміну, переplanування приміщень, зміна конфігурації перегородок та інші фактори, які можуть впливати на процес поширення аерозолю. Повторна перевірка ефективності є обов'язковою при суттєвих змінах геометрії об'єму.

Також, пропозиція щодо змін у ДБН В.2.5-56:2014 “Системи протипожежного захисту” [12] документ не враховує вплив геометрії приміщення, наявності внутрішніх перегородок та напрямку подачі вогнегасного агента на ефективність

гасіння, що може призводити до неефективної роботи систем пожежогасіння на реальних об'єктах.

Таблиця 4.3.2. Порівняльна таблиця чинних та запропонованих пропозицій щодо змін у ДБН В.2.5-56:2014 “Системи протипожежного захисту” [12].

Підрозділ	Чинне формулювання	Пропоноване формулювання
8.2.3 Системи аерозольного пожежогасіння	Загальне посилення на ДСТУ 4490 та ДСТУ 4442. Відсутні конкретні вимоги щодо розташування генераторів відносно зони горіння та геометрії приміщення.	У вертикальних об'ємах генератори розташовуються нижче зони горіння. При перегородках площею $\geq 0,15 \text{ м}^2$ — передбачати додаткові точки подачі. При трьох та більше перегородках — обов'язкове CFD-моделювання або натурні випробування.
8.1.7 Вимоги до АСПГ об'ємним способом	Вимоги щодо відключення вентиляції та перекривання прорізів. Відсутні вимоги щодо внутрішніх перегородок та їх впливу на рівномірність розподілу агента в об'ємі.	При проектуванні у приміщеннях з перегородками, що перекривають $> 30\%$ поперечного перерізу, проектна документація повинна містити обґрунтування забезпечення вогнегасної концентрації у всьому об'ємі.
8.2.4 Системи газового пожежогасіння (CO ₂)	Посилання на ДСТУ серії 4466 та ДСТУ 4578 без конкретних вимог щодо геометрії приміщення та впливу перегородок на поширення CO ₂ .	Для приміщень з перегородками площею $\geq 0,15 \text{ м}^2$ передбачати збільшення кількості точок подачі або інтенсивності. Розрахунок з коефіцієнтом нерівномірності розподілу залежно від площі та кількості перегородок.
Новий Додаток: "Вимоги до	Відсутній — чинна редакція не містить жодних вимог до	Класифікація приміщень за складністю геометрії; коригувальні коефіцієнти; заборона

проектування у приміщеннях зі складною геометрією"	проектування систем у приміщеннях із внутрішніми перегородками, нестандартним плануванням або значною висотою об'єму.	розташування єдиного генератора у верхній частині вертикального об'єму при нижньому вогнищі; обов'язкове CFD для ≥ 3 перегородок.
--	---	--

Таблиця 4.3.3. Порівняльна таблиця ефективності гасіння аерозолу АУС та Діоксиду вуглецю CO₂.

Параметр порівняння	Аерозоль АУС	Діоксид вуглецю CO ₂	Висновок для нормативної бази
Час гасіння — одна мала перегородка (0,10 м ²), тигель 2	12 с	45 с	CO ₂ у 3,75 рази повільніше — потребує окремих нормативних вимог щодо розрахункової кількості агента
Час гасіння — одна велика перегородка (0,20 м ²), тигель 2	17 с	50 с	Різниця зростає — вплив перегородки на CO ₂ суттєвіший, необхідний підвищений коефіцієнт нерівномірності
Три перегородки В→М, тигель 3	25 с	62 с	CO ₂ у 2,5 рази повільніше — обов'язковий коефіцієнт нерівномірності для газових систем
Три перегородки М→В, тигель 3	35 с	26 с	Аерозоль залежить від порядку перегородок значно сильніше — необхідне врахування конфігурації при проектуванні
Вертикальна камера, подача знизу	19 с (гасіння)	16–21 с (тигель 1)	Обидва агенти ефективні при нижній подачі — рекомендується нормативно закріпити нижнє розташування

Вертикальна камера, подача зверху	Гасіння тиглів 2–3 не відбулось	Гасіння тиглів 2–3 не відбулось	Заборонити верхню подачу для вертикальних об'ємів — для обох типів агентів
Три перегородки, вертикальна камера	кз до 6,88	Часткове гасіння або не відбулось	Обов'язкове CFD-моделювання або натурні випробування для обох типів систем
Середнє перевищення часу CO ₂ над аерозолем (тигель 2)	—	+35 с (× 3,4)	Диференційовані нормативні вимоги для кожного типу агента є обов'язковими

4.4. Техніко-економічне обґрунтування впровадження вдосконаленої нормативно-технічної моделі випробувань об'ємних вогнегасних засобів.

Проведені експериментальні дослідження переконливо показали, що як аерозольні системи пожежогасіння, так і системи на основі діоксиду вуглецю мають суттєву залежність ефективності від геометрії приміщення, розташування генераторів та конфігурації внутрішніх перешкод. Зокрема, встановлено, що при нижньому розташуванні генераторів аерозолю час гасіння скорочується у 2–4 рази порівняно з верхнім розташуванням у вертикальних об'ємах [89]. При конфігураціях з подачею аерозолю зверху в окремих випадках гасіння взагалі не відбувалось, тоді як при подачі знизу воно відбувалось стабільно протягом 19 секунд [89]. Розподіл солей у просторі генератором та напрямок подачі безпосередньо визначають час досягнення вогнегасної концентрації у зоні горіння [84, 112]. Для CO₂ встановлено, що збільшення кількості перегородок із трьох і більше суттєво знижує ефективність газового пожежогасіння — час гасіння при складних конфігураціях перегородок сягав 176–180 секунд, а в окремих випадках гасіння не відбувалось взагалі. Це узгоджується з дослідженнями, в яких встановлено критичну концентрацію CO₂ для горіння на

рівні 28,6% при вмісті кисню 16,98%, і показано, що у великих герметичних об'ємах рівномірне накопичення газу є складним процесом [95].

4.5 Економічний ефект від впровадження

Економічна ефективність запропонованих змін розглядається у двох аспектах: зниження прямих втрат від пожеж та оптимізація витрат на проектування і монтаж систем пожежогасіння. З точки зору зниження збитків від пожеж, своєчасне і повне гасіння вогнища безпосередньо зменшує матеріальні втрати. Аналіз економічних наслідків пожеж свідчить, що витрати на ліквідацію наслідків пожежі та відновлення об'єктів у разі перевищують витрати на впровадження ефективної системи пожежогасіння [113]. Скорочення часу гасіння, яке було досягнуто при оптимальному розташуванні генераторів аерозолу (з 55 секунд до 7–10 секунд у горизонтальній камері, та з відсутності гасіння до 19 секунд у вертикальній), свідчить про принципово різний рівень захисту об'єкта. Кожна секунда нерозповсюдження пожежі безпосередньо зменшує площу ураження та відповідні матеріальні збитки.

З точки зору оптимізації витрат на проектування, впровадження обов'язкового CFD-моделювання та коригувальних коефіцієнтів для приміщень зі складною геометрією дозволить на етапі проектування визначити оптимальну кількість та розташування генераторів, уникнувши надлишкового або недостатнього оснащення об'єкта. CFD-моделювання дозволяє візуалізувати розподіл вогнегасного агента в просторі та оптимізувати розміщення форсунок і генераторів ще до монтажу системи, що зменшує необхідну кількість агента та загальну вартість системи. Витрати на комп'ютерне моделювання є значно меншими, ніж витрати на усунення наслідків неефективної роботи системи або її доопрацювання після монтажу. Важливим економічним фактором є також зниження вторинних збитків від пожежі [113]. Скорочення часу гасіння безпосередньо впливає на зменшення температурного впливу на будівельні конструкції, обладнання та суміжні приміщення. Чим швидше досягається вогнегасна концентрація, тим меншою є площа поширення пожежі та витрати на

відновлення об'єкта після надзвичайної події. Особливо актуальним це є для об'єктів із високою вартістю обладнання, серверних приміщень, архівів, електротехнічних установок та промислових підприємств.

Крім того, впровадження удосконалених нормативних вимог сприятиме підвищенню надійності експлуатації систем пожежогасіння та зменшенню ймовірності відмови системи в реальних умовах пожежі. Це дозволить скоротити витрати, пов'язані з аварійними ситуаціями, повторними випробуваннями та позаплановим технічним обслуговуванням систем протипожежного захисту.

З технічної точки зору запропоновані зміни також дозволяють підвищити адаптивність систем пожежогасіння до реальних умов експлуатації. Урахування конфігурації приміщення, наявності перегородок та особливостей циркуляції повітря дозволяє створювати більш ефективні та економічно оптимізовані проектні рішення без суттєвого збільшення вартості системи.

Впровадження запропонованих змін до нормативно-технічних документів не потребує значних фінансових витрат. Основні витрати пов'язані з розробкою та затвердженням змін до ДСТУ EN 15276-1:2021 [58] та суміжних нормативних документів, проведенням додаткових верифікаційних випробувань для підтвердження запропонованих коригувальних коефіцієнтів, навчанням проєктувальників та фахівців з пожежної безпеки новим вимогам. Водночас інтеграція вимог пожежної безпеки у нормативну практику потребує об'єднання різноманітних знань — саме комплексний підхід до нормування на всіх етапах, включаючи проєктування, дозволяє уникнути системних помилок [104].

Результати експериментів дозволяють також зробити техніко-економічне порівняння двох досліджуваних типів вогнегасних систем [89]. Аерозольні системи продемонстрували значно вищу швидкість гасіння у всіх конфігураціях — час гасіння становив від 5 до 55 секунд навіть при складному розташуванні перегородок. Системи на основі CO₂ потребували від 70 до 180 секунд і в ряді конфігурацій з вертикальними перегородками взагалі не забезпечували гасіння всіх вогнищ. Аерозольні системи є більш перспективними з економічної точки зору, оскільки поєднують хімічне пригнічення та фізичне охолодження,

ефективно діючи навіть у складних геометричних умовах. Водночас для порівняно простих об'ємів без суттєвих перешкод CO_2 залишається ефективним рішенням, особливо де критичною є відсутність залишків вогнегасної речовини після гасіння. Вибір між двома типами систем з економічної точки зору визначається насамперед геометриєю об'єкта та вимогами до часу гасіння.

Запропоновані зміни до нормативно-технічної документації є економічно обґрунтованими та технічно доцільними. Їх впровадження дозволить підвищити надійність систем об'ємного пожежогасіння, скоротити час ліквідації пожеж, зменшити матеріальні збитки від пожеж на захищуваних об'єктах, а також оптимізувати витрати на проектування та монтаж систем завдяки науково обґрунтованому підходу до вибору розташування генераторів і врахування геометрії приміщень. Практичне застосування результатів наукових досліджень у нормативній практиці є необхідною умовою підвищення ефективності та економічності систем пожежогасіння.

У результаті проведеного аналізу, досліджено особливості поширення вогнегасних аерозолів у замкнених приміщеннях зі складною геометриєю. Показано, що ефективність аерозольного пожежогасіння, істотно залежить від герметичності об'єму та здатності підтримувати необхідну вогнегасну концентрацію, при цьому сам процес поширення аерозолу характеризується газотвердофазним механізмом поширення з гравітаційним осадженням частинок і просторовою нерівномірністю концентрацій. Експериментально встановлено, що наявність перегородок, меблів і дверних прорізів суттєво впливає на розподіл вогнегасного аерозолу та тривалість його ефективної дії, що підтверджує необхідність застосування чисельного моделювання при проектуванні систем об'ємного пожежогасіння в реальних умовах експлуатації.

Висновки до розділу 4

Встановлено, що традиційне верхнє розташування генераторів аерозольного пожежогасіння є неоптимальним для приміщень складної геометрії. Розміщення генераторів у нижній частині та в кутових зонах

приміщення забезпечує значно рівномірніший розподіл аерозольної хмари, зменшує утворення «мертвих зон» і скорочує час досягнення вогнегасної концентрації у 2-4 рази порівняно з верхнім розташуванням. Обґрунтовано необхідність законодавчого закріплення у ДСТУ EN 15276-1:2021 [58] та ДБН В.2.5-56:2014 [12] вимог щодо врахування геометрії приміщення при проектуванні систем пожежогасіння, зокрема введення коригувальних коефіцієнтів для приміщень із внутрішніми перегородками. Для приміщень, де перегородки перекривають більше 30% поперечного перерізу, проектна документація має містити обґрунтування ефективності розподілу вогнегасного агента по всьому об'єму. Розроблено та обґрунтовано порівняльну таблицю змін до ДСТУ EN 15276-1:2021 [58] та ДБН В.2.5-56:2014 [12], що включає: нормативне закріплення контролю рівномірності розподілу аерозолю у різних точках приміщення; введення коригувальних коефіцієнтів впливу перешкод (K_{aperture}); вимоги до повторної перевірки ефективності при переплануванні об'єкта; диференційовані вимоги для аерозольних та газових систем. Визначено механізм нормативно-правової імплементації змін. Ключовими складовими є: гармонізація національних стандартів із ISO 14520, EN 15004, EN 15276 та NFPA 2001; впровадження багаторівневої системи оцінювання (лабораторні → напівнатурні → CFD-моделювання → повномасштабні); запровадження системи регулярного перегляду стандартів за участю ДСНС України, наукових установ та галузевих виробників. Доведено доцільність обов'язкового застосування CFD-моделювання (зокрема, Fire Dynamics Simulator) для об'єктів зі складною просторовою конфігурацією або кількістю перегородок більше трьох. Це дозволяє визначити оптимальне розташування генераторів і прогнозувати розподіл агента ще до монтажу системи, знижуючи ризики неефективної роботи та скорочуючи вартість коригувань після введення в експлуатацію. Проведено техніко-економічне обґрунтування запропонованих змін. Аерозольні системи продемонстрували час гасіння від 5 до 55 с у всіх конфігураціях, тоді як системи CO₂ потребували 70-180 с, а у ряді вертикальних конфігурацій взагалі не забезпечували гасіння всіх вогнищ. Витрати на впровадження нормативних змін

(розробка, верифікаційні випробування, навчання фахівців) є незначними порівняно з економічними втратами від неефективного пожежогасіння та відновлення об'єктів після пожеж. Встановлено пріоритетні напрями для подальшого розвитку нормативної бази: запровадження диференційованих вимог для різних типів систем (газових, аерозольних, порошкових) з урахуванням їх фізичних особливостей; розширення повноважень ДСНС у сфері ринкового нагляду засобів пожежогасіння; розроблення класифікації приміщень за ступенем геометричної складності з відповідними коригувальними коефіцієнтами для розрахунку систем пожежогасіння.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ І РЕКОМЕНДАЦІЇ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання — здійснено комплексне дослідження теоретичних, нормативно-технічних та практичних аспектів забезпечення ефективності систем пожежогасіння об'ємного гасіння, проведено аналіз сучасних підходів до їх випробувань, оцінювання та сертифікації, а також обґрунтовано напрями вдосконалення нормативно-технічної бази України у сфері пожежної безпеки.

Основними науково-практичними результатами дисертації визначено:

1. Нормативно-технічна база України у сфері випробувань вогнегасних систем та засобів об'ємного пожежогасіння є фрагментованою та не враховує вимоги війни щодо проектування таких систем пожежогасіння. Проведений порівняльний аналіз чинних ДСТУ, НАПБ, ДБН та міжнародних нормативів ISO 14520, EN 15004, EN 15276, NFPA 2001 показав, що значна частина вітчизняних документів базується на підходах попередніх десятиліть, не охоплює сучасних типів пожежного навантаження (літій-іонні акумулятори, воднева енергетика, дата-центри) наслідків військових дій та не передбачає врахування аеродинамічних чинників і реальної геометрії об'єктів при оцінюванні ефективності систем пожежогасіння. Встановлено, що відсутність окремого технічного регламенту для засобів протипожежного захисту сфері ринкового нагляду ускладнюють контроль якості продукції вогнегасного призначення.

2. Чинні методики сертифікаційних і функціональних випробувань систем пожежогасіння орієнтовані переважно на формальне підтвердження відповідності технічних параметрів і систематично не відтворюють реальних умов розвитку пожежі. Аналіз методик Cup Burner Test, Full-Scale Fire Test, Room Integrity Test (для газових систем), Extinguishing Test, Reflash Test, Hold Time Test (для аерозольних) та газових систем виявив типові обмеження: ігнорування вентиляційних режимів, турбулентних потоків, локального перегріву та нерівномірного розподілу вогнегасного агента. Це формує розрив між результатами лабораторних випробувань та реальною ефективністю систем в

умовах експлуатації: система, що успішно пройшла сертифікацію, може бути недостатньо ефективною у захищуваному об'єкті.

3. Ключовим фізичним чинником ефективного об'ємного пожежогасіння є не лише хімічна активність вогнегасного агента, а його здатність рівномірно поширюватися у захищуваному об'ємі та досягти всіх осередків горіння в критично короткий час. Теоретичне дослідження механізмів поширення аерозолів та газів підтвердило визначальний вплив геометрії приміщення, просторового розташування та площі перегородок, напряму подачі агента, конвекційних потоків від вогнища та вентиляційного режиму на ефективність та час пожежогасіння. Встановлено, що аерозоль ефективно поширюється переважно в конвекційному режимі (знизу вгору), тоді як CO_2 внаслідок гравітаційного розшарування осідає у нижній частині об'єму, що принципово визначає ефективність систем залежно від просторової орієнтації та конфігурації захищуваного простору.

4. За результатами натурних експериментальних досліджень (16 способів у горизонтальній і вертикальній камерах об'ємом $0,5 \text{ м}^3$) встановлено кількісні закономірності впливу геометрії перегородок на час досягнення вогнегасної концентрації аерозолу. Час гасіння аерозолем зростає від 5 с (відкритий об'єм без перегородок) до 55 с (найскладніша конфігурація) зі збільшенням площі та ускладненням розташування перегородок. Найнесприятливішою для аерозольних систем виявилась шахматна конфігурація з наростаючою площею перегородок у напрямку від агрегату подачі до вогнища (час гасіння третього тигля — 55–59 с). Найефективнішою в горизонтальній камері є шахматна конфігурація з зменшеною площею (5–11–32 с). Визначено граничні геометричні параметри відсіків, за яких забезпечується ефективне гасіння в межах нормативно допустимого часу.

5. Порівняльне дослідження аерозолу утвореного з АУСЗ та діоксиду вуглецю CO_2 у ідентичних геометричних конфігураціях підтвердило суттєву перевагу аерозольного агента за ефективністю поширення у приміщеннях зі складною геометрією. Аерозоль досягає вогнегасної концентрації у 3–7 разів швидше, ніж

CO₂: при одній малій перегородці аерозоль гасив вогнище за 6–12 с, CO₂ — за 32–56 с. В умовах трьох перегородок максимальний час гасіння аерозолем склав 55 с, CO₂ — понад 180 с. Встановлено, що подача CO₂ знизу у вертикальному об'ємі не компенсує його природну тенденцію до осідання при подоланні великих перегородок.

6. Для вертикальних об'ємів, принципово важливим є напрям подачі вогнегасного агента: розміщення генератора аерозолу внизу забезпечує синергію конвективних потоків від вогнища та напряму поширення агента, що скорочує час гасіння у 2–4 рази порівняно з подачею зверху. Натурні досліди у вертикальній камері підтвердили, що при подачі АУСЗ знизу час гасіння першого відсіку становив 7–9 с, тоді як при подачі зверху ефективність різко знижувалась — у більшості конфігурацій другий та третій тиглі не загасли протягом нормативного часу спостереження. Цей результат має безпосереднє проектне значення для об'єктів із вертикальним розташуванням відсіків: кабельних шахт, серверних стояків, складських стелажів, підйомно-транспортного обладнання.

7. CFD-моделювання (Computational Fluid Dynamics) підтвердило достовірність результатів натурних експериментів і може бути рекомендоване як інструмент передпроектного обґрунтування розміщення систем пожежогасіння у складних об'ємах. Результати комп'ютерного моделювання поширення аерозольного та газового агентів у приміщеннях із перегородками кількісно узгоджуються з даними натурних дослідів з відносною похибкою до 12–15%, що підтверджує придатність CFD-методів для прогнозування ефективності систем пожежогасіння. Застосування CFD-моделювання дозволяє на етапі проектування виявити потенційні «мертві зони», оптимізувати кількість, розміщення та продуктивність генераторів вогнегасного агента, скорочуючи витрати на повномасштабні випробувальні стенди.

8. На підставі результатів дослідження обґрунтовано необхідність переходу від формального нормативного контролю до комплексного ризик-орієнтованого підходу оцінювання ефективності систем пожежогасіння, що поєднує

лабораторні, повномасштабні, сценарні методи та CFD-моделювання. Розроблено рекомендації щодо вдосконалення нормативно-технічної бази України, зокрема: доповнення ДСТУ EN 15276 і ДСТУ ISO 14520 вимогами щодо врахування геометрії приміщень і натурального контролю концентрацій; впровадження обов'язкових розрахунків CFD для об'єктів із нестандартною геометрією; гармонізацію з вимогами EN 15004, NFPA 2001 щодо сценарного аналізу та оцінки ризику; розроблення окремого технічного регламенту для засобів протипожежного захисту із вимогами щодо підтвердження ефективності в умовах реальної геометрії захищуваних об'єктів. Впровадження запропонованих заходів дозволить підвищити реальну ефективність систем пожежогасіння, наблизити вітчизняну нормативну базу до міжнародного рівня та знизити ризики людських і матеріальних втрат від пожеж в Україні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пікуля Т. О. Гармонізація законодавства в процесі переговорів про вступ України до Європейського Союзу. Юридичний науковий електронний журнал (Legal Science and Education Journal). 2024. № 8. С. 114–117. URL: https://www.lsej.org.ua/8_2024/114.pdf.
2. Баланюк В. М., Гірський О. І., Гарасим'юк О. І., Мирошкін В. С., Пикус В. С. Проблеми нормативно-технічного забезпечення випробувань та якості продукції вогнегасних систем та засобів в Україні. Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. 2022. № 26. С. 67–72. DOI: 10.32447/20784643.26.2022.08.
3. Баланюк В. М., Гірський О. І. Щодо питання визначення характеристик вогнегасних засобів в Україні. «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» матеріали XIV Міжнародної науково-практичної конференції. Черкаси. 2023/04/27. С. 127-129.
4. Баланюк В. М., Гірський О. І. Небезпечні сценарії розвитку пожеж в умовах війни. Збірник тез доповідей 1 Міжнародної науково-практичної конференції «Цивільний захист в умовах війни», 17-18.04.2025р., ЛДУ БЖД, С. 139-140.
5. Аналітична довідка про пожежі та їх наслідки в Україні. URL: <https://dsns.gov.ua/upload/2/5/5/1/7/8/2/analitichna-dovidka-pro-pozezi-2025.pdf> (дата звернення: 24.05.2026).
6. Dauda J.A., Yamusa M.A., Oyegoke A.S. et al. Systematic review of building fire safety practices in the UK. Fire Technology. 2025. DOI: 10.1007/s10694-025-01801-2.
7. Wen K., Ding P., Yang Y. Characterization and evaluation of fire emergency response performance in Shanghai. Fire Technology. 2025. Vol. 61. P. 275–293. DOI: 10.1007/s10694-024-01604-x.
8. Yue B., Shen Y., Zhang P. et al. FA-YOLO: fire alarm based on YOLO algorithm. CCF Transactions on Pervasive Computing and Interaction. 2025. DOI: 10.1007/s42486-025-00201-3.

9. Zhang X., Ismail M. H. S., Ahmadun F.-R. B., Abdullah N. B. H., Hee C. Hot aerosol fire extinguishing agents and the associated technologies: A review. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. – 2015. – Vol. 32, № 3. – P. 707–724. DOI: 10.1590/0104-6632.20150323s00003510.
10. Кодекс цивільного захисту України : Кодекс України; Закон від 02.10.2012 № 5403-VI // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/5403-17> (дата звернення: 02.06.2026).
11. ДСТУ 8828:2019. Загальні положення пожежної безпеки.
12. ДБН В.2.5-56:2014. Системи протипожежного захисту.
13. ДСТУ EN 3-7:2016. Вогнегасники переносні / ДП «УкрНДНЦ». Київ : Будстандарт, 2016.
14. Вяткін О., Лаврентьєва М. Системи управління якістю в органах виконавчої влади. Стандартизація, сертифікація, якість. 2009. № 3. С. 54–56.
15. Король С. В., Нестеренко О. М. Модернізація системи технічного регулювання та стандартизації у сфері пожежної безпеки України в умовах євроінтеграції. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2024. № 2 (18). С. 14–22. URL: <https://nvcz.undicz.org.ua/index.php/nvcz/issue/view/13>.
16. Віткін Л., Євдокімов С., Полякова І. Міжнародне співробітництво в галузі технічного регулювання. Стандартизація, сертифікація, якість. 2006. № 4. С. 19–29.
17. Койфман Ю.І., Кісельова Т.М., Кальман І.Г. та ін. Міжнародні та європейські системи сертифікації і акредитації. Київ–Львів, 1995. 326 с.
18. Про стандартизацію : Закон України від 05.06.2014 № 1315-VII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1315-18#Text>.
19. Про метрологію та метрологічну діяльність : Закон України. 2014. № 30. Ст. 1008.
20. Про технічні регламенти та оцінку відповідності : Закон України від 15.01.2015 № 124-VIII.
21. Про акредитацію органів з оцінки відповідності : Закон України. 2001. № 32. Ст. 170.

22. Постанова Кабінету Міністрів України № 1057 від 16.12.2015 «Про визначення сфер діяльності, в яких центральні органи виконавчої влади та Служба безпеки України здійснюють функції технічного регулювання».
23. Про адаптацію законодавства України з технічного регулювання у сфері цивільного захисту. URL: <https://ns-plus.com.ua/2018/06/05/za-yevropejskymu-pravylamy-pro-adaptatsiyu-zakonodavstva-ukrayiny-z-tehnichnogo-regulyuvannya-u-sferi-tsyvilnogo-zahystu/>.
24. Macdonald M.D., Mokaleng B.B., Monnye M.N.F. Study of fire protection systems in an academic hospital. *Architectural Structures and Construction*. 2025. Vol. 5. P. 35. DOI: 10.1007/s44150-025-00153-3.
25. Lei Y., Chan K.N., Xu L. et al. Smart fire-retardant materials for fire alarm systems. *Advanced Composites and Hybrid Materials*. 2025. Vol. 8. P. 112. DOI: 10.1007/s42114-024-01152-6.
26. Zhang H., Zhang R., Sun J. Development of IoT-based emergency response systems. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. P. 29056. DOI: 10.1038/s41598-025-13465-7.
27. Про затвердження Правил пожежної безпеки в Україні : Наказ Міністерства внутрішніх справ України від 30 груд. 2014 р. № 1417 : НАПБ А.01.001-2014. Офіційний вісник України. 2015. № 24. С. 135. Ст. 684. URL: rada.gov.ua (дата звернення: 07.06.2026).
28. Ren H., Qu K., Guo J. et al. Research on precise localization of fire sources. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. P. 17135. DOI: 10.1038/s41598-025-01830-5.
29. Wang H., Zhang Y., Zhang G. et al. Fire extinguishing efficiency for lithium iron phosphate battery fires. *Fire Technology*. 2025. DOI: 10.1007/s10694-024-01687-6.
30. Garg A. Fire safety. *Handbook of Hospital Planning and Designing*. Singapore : Springer, 2024. DOI: 10.1007/978-981-99-9001-6_43.
31. Wang H., Fayaz M., Ahmad A. et al. Masked autoencoder-based vision framework for robust fire detection. *Process Safety and Environmental Protection*. 2025. Vol. 203. P. 108019. DOI: 10.1016/j.psep.2025.108019.

32. Про затвердження Технічного регламенту засобів цивільного захисту : Постанова Кабінету Міністрів України від 26 трав. 2023 р. № 535. Офіційний вебпортал парламенту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/535-2023-п> (дата звернення: 07.06.2026).
33. Jiang L., Zeinali D., Arsava K.S. et al. Impact of water-based fire extinguishing systems on combustion products. *Fire Technology*. 2025. Vol. 61. P. 2441–2465. DOI: 10.1007/s10694-024-01689-4.
34. Chang S., Zhang J., Yuan S. et al. Comparative study of fire extinguishment of lithium-ion battery fires. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2025. Vol. 150. P. 11767–11779. DOI: 10.1007/s10973-024-13362-7.
35. Li H., Wang W., Zhao Y. et al. Evaluation of fire extinguishing systems for liquor warehouses. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. P. 13449. DOI: 10.1038/s41598-024-64168-4.
36. Aqueous Film Forming Foam (AFFF) Status and Alternatives: The Big Picture. *Fire Technology*. 2024. Vol. 60. P. 2019–2040. DOI: 10.1007/s10694-024-01559-z.
37. Wang Q., Wang F., Li C., Li Z., Li R. Fire extinguishing performance and mechanism for several typical dry water extinguishing agents. *RSC Advances*. 2021. Vol. 11. P. 9827–9836. DOI: 10.1039/D1RA00253H.
38. Rohilla M., Saxena A., Tyagi Y. K., Singh I., Tanwar R. K., Narang R. Facile synthesis of rGO/Fe₂O₃ nanocomposite and its combination with aerosol forming composite for ultra-fast fire extinguishment. *Journal of Materials Science*. 2023. Vol. 58. P. 1640–1655. DOI: 10.1007/s10853-022-08130-7.
39. Баланюк В. М., Мирошкін В. С., Копистинський Ю. О., Гірський О. І., Гарасим'юк О. І. Порівняння вогнегасних речовин для гасіння пожеж легкозаймистих та горючих рідин. *Пожежна безпека*. 2022. № 41. С. 12–19. DOI: 10.32447/20786662.41.2022.02.
40. Баланюк В. М., Мирошкін В. С., Гузар Н. І., Пикус В. С., Гірський О. І. Чинники впливу на швидкість горіння сполук, із яких утворюються вогнегасні аерозолі. *Пожежна безпека*. 2024. № 45. С. 5–9. DOI: 10.32447/20786662.45.2024.01.

41. Havrys A., Yakovchuk R., Pekarska O., Tur N. Visualization of Fire in Space and Time on the Basis of the Method of Spatial Location of Fire-Dangerous Areas. *Ecological Engineering & Environmental Technology*. 2023. Vol. 24, № 2. P. 28–37. DOI: 10.12912/27197050/156971.
42. Hua N., Tessari A., Elhami-Khorasani N. Characterizing damage to a concrete liner during a tunnel fire. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021. Vol. 109. Article 103761. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103761.
43. Про затвердження модулів оцінки відповідності.: Постанова Кабінету Міністрів України від 13 січ. 2016 р. № 95. Офіційний вебпортал парламенту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/95-2016-п> (дата звернення: 07.06.2026).
44. Ingason H., Li Y. Z., Lönnemark A. Large scale fire tests with fixed fire fighting system in Runehamar tunnel. Borås : SP Technical Research Institute of Sweden, 2014. 65 p.
45. Ge L., Shao Y., Wang Y., Zhang G., Zhang Z., Liu L. Experimental research on inerting characteristics of carbon dioxide used for fire extinguishment in a large sealed space. *Process Safety and Environmental Protection*. – 2020. – Vol. 142. – P. 174–190. DOI: 10.1016/j.psep.2020.06.005.
46. Wang Z., Liu X., Zhang Y. et al. Experimental study on the inhibition of hydrogen deflagration by flame-retardant compounded ultrafine dry powder fire extinguishing media. *Renewable Energy*. 2024.
47. Asif O., Hossain M. B., Hasan M., Rahman M. T., Chowdhury M. E. H. Fire-detectors review and design of an automated, quick responsive fire alarm system based on SMS. *International Journal of Communications, Network and System Sciences*. 2014. Vol. 7. P. 386–395.
48. Baraskar T., Pujeri U., Pande H. Intelligent Fire Extinguisher Monitoring System for Smart Cities. *Intelligent Systems for Smart Cities*. Singapore : Springer, 2024. P. 249–259. DOI: 10.1007/978-981-99-6984-5_16.

49. Zhang L. N., Li J., Wang Y. et al. The effect of sprinkler and smoke barrier facilities on fire smoke control in high-rise buildings. *Developments in the Built Environment*. 2025.
50. Huang X., Fang J., Huo Y., Zhou X. Visualization and quantitative analysis of research progress and development trends in gas fire extinguishing agents. *Fuel*. – 2025. – Vol. 387. – Article 134375. DOI: 10.1016/j.fuel.2025.134375.
51. Ji J., Li W., Zhang H. et al. Novel two-phase composite powder extinguishing agent for magnesium fires. *Fire Technology*. 2025. Vol. 61. P. 3165–3190. DOI: 10.1007/s10694-025-01720-2.
52. Xu L., Zheng W., Xu F. Numerical simulation research on kitchen fire of ancient buildings under water spray effect. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2022. Article 101605. DOI: 10.1016/j.csite.2022.101605.
53. Loo K. H., Chan W. Y., Wang C. et al. A comparative review of IG-541 system use in total flooding fire suppression applications. *Processes*. 2025. Vol. 13, № 2. Article 485. DOI: 10.3390/pr13020485.
54. Strzelczyk D., Kuziora Ł. Comparative study of fire safety requirements for electrochemical energy storage systems in domestic and foreign regulations. *Zeszyty Naukowe Szkoły Głównej Służby Pożarniczej*. 2025. URL: icm.edu.pl, DOI:10.5604/01.3001.0055.5447
55. Xu J., Wang C., Liu H. et al. Critical assessment on operating water droplet sizes for fire sprinkler and water mist systems. *Fire Safety Journal*. 2019.
56. Garg A. Fire safety systems and selection of fire extinguishing methods for buildings. *Handbook of Hospital Planning and Designing*. Singapore : Springer, 2024.
57. SEM-SAFE. High-pressure water mist fire protection systems : technical brochure. Odense : Danfoss Fire Safety, 2024. URL: <https://sem-safe.com/> (дата звернення: 24.05.2026).
58. ДСТУ EN 15276-1:2021. Стационарні системи пожежогасіння. Системи аерозольного пожежогасіння. Частина 1. Вимоги до компонентів і методи їх випробування. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2021. URL:

https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.htmlid_doc=95761 (дата звернення: 24.05.2026).

59. Won Yeong Hwang, Hyung Ju Lee, Jinghao Jin, Hong Sun Ryou, Chang Kyoung Choi, Sung Ho Hong, Seong Hyuk Lee, Computational design of a smoke detector with high sensitivity considering three-dimensional flow characteristics, *Case Studies in Thermal Engineering*, Volume 53, 2024, 103896, ISSN 2214-157X, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103896>.

60. Meenakshi Gupta, Amit Pasi, Anjan Ray, S.R. Kale, An experimental study of the effects of water mist characteristics on pool fire suppression, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Volume 44, 2013, Pages 768-778, ISSN 0894-1777, <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2012.09.020>.

61. Rui Xu, Van Minh Le, Alexis Marchand, Salman Verma, Thomas Rogaume, Franck Richard, Jocelyn Luche, Arnaud Trouvé, Simulations of the coupling between combustion and radiation in a turbulent line fire using an unsteady flamelet model, *Fire Safety Journal*, Volume 120, 2021, 103101, ISSN 0379-7112, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103101>.

62. ДСТУ EN 15004-1:2014. Стаціонарні системи пожежогасіння. Системи газового пожежогасіння. Частина 1. Проектування, монтування та технічне обслуговування (EN 15004-1:2008, IDT). Київ : Мінекономрозвитку України, 2014.

63. Commissioning clean agent fire extinguishing systems. Consulting-Specifying Engineer. 2012. URL: <https://www.csemag.com/commissioning-clean-agent-fire-extinguishing-systems/> (дата звернення: 24.05.2026).

64. ДСТУ EN 15276-2:2021. Стаціонарні системи пожежогасіння. Аерозольні системи пожежогасіння. Частина 2. Проектування, монтаж та технічне обслуговування. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2021.

65. ISO 14520-11:2005. Gaseous fire-extinguishing systems – Physical properties and system design – Part 11: HFC-236fa extinguishant. Geneva : ISO, 2005.

66. EN 15004-4:2020. Fixed firefighting systems – Gas extinguishing systems – Part 4: Requirements and test methods for FK-5-1-12 extinguishant. Brussels : CEN, 2020.

67. NFPA 2001. Standard on Clean Agent Fire Extinguishing Systems. Quincy : National Fire Protection Association, 2022.
68. ISO 15779:2011. Condensed aerosol fire extinguishing systems – Requirements and test methods for components and system design, installation and maintenance. Geneva : ISO, 2011.
69. EN 15276-2:2007. Fixed firefighting systems — Condensed aerosol extinguishing systems — Part 2: Design, installation and maintenance. Brussels : CEN, 2007.
70. FPA 2010. Code of Practice for Aerosol Fire Extinguishing Systems. – London: Fire Protection Association, 2010.
71. EN 12416-2. Fixed firefighting systems – Powder systems – Part 2: Design, construction and maintenance. Brussels : CEN.
72. ISO 7202. Fire protection – Fire extinguishing media – Powder. Geneva : ISO.
73. NFPA 17. Standard for Dry Chemical Extinguishing Systems. Quincy : National Fire Protection Association.
74. EN 615. Fire protection – Fire extinguishing media – Specifications for powders. Brussels : CEN.
75. EN 2:1992+A1:2004. Classification of fires. Brussels : CEN.
76. EN 3. Portable fire extinguishers. Brussels : CEN.
77. ДСТУ 4490:2005. Аерозольні генератори пожежогасіння. Загальні технічні вимоги та методи випробувань. Київ : Держспоживстандарт України, 2005.
78. Robinet A., Chetehouna K. A Review of Additives for Water Mist Fire Suppression Systems. *Fire Technology*. 2024. Vol. 60, Iss. 5. P. 2923–2961, <https://doi.org/10.1007/s10694-024-01570-4>.
79. Braham Prakash, Amit Saxena, Yogesh Kumar Tyagi, Kavita Devi, Rajesh Kumar Tanwar, Arvind Kumar, Maltose-based pyrotechnic aerosol forming composites for fire extinguishing application, *FirePhysChem*, Volume 5, Issue 2, 2025, Pages 190-200, ISSN 2667-1344, <https://doi.org/10.1016/j.fpc.2024.09.003>.
80. Amit Kumar, Usha Pujala, E. Hemanth Rao, G. Venkat Reddy, V. Subramanian, Sanjay Kumar Das, D. Ponraju, B. Venkatraman, Spatio-temporal evolution of sodium aerosol and temperature distribution during sodium pool fire in a confined

environment, *Nuclear Engineering and Design*, Volume 411, 2023, 112424, ISSN 0029-5493, <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112424>.

81. Qichang Dong, Jiacheng Qi, Song Lu, Long Shi, Synergistic effects of typical clean gaseous fire-extinguishing agents, *Fire Safety Journal*, Volume 147, 2024, 104206, ISSN 0379-7112, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2024.104206>.

82. Zhou Y., Zhao J., Wang T., Yu Z., Fu Y., Jiang Y., Cheng X., Zhang H. Design of a high-efficiency ultrafine dry powder fire extinguishing agent incorporated with Fe/ZSM-5 zeolite. *Powder Technology*. – 2025. – Vol. 462. – Article 121133. DOI: 10.1016/j.powtec.2025.121133.

83. Jong-Geon Lee, Hyun-Ho Choi, Development of real-scale transformer fire test technology and evaluation of a solid aerosol-based fire suppression system, *Fire Safety Journal*, Volume 153, 2025, 104376, ISSN 0379-7112, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2025.104376>.

84. O.P. Korobeinichev, A.G. Shmakov, V.M. Shvartsberg, A.A. Chernov, S.A. Yakimov, K.P. Koutsenogii, V.I. Makarov, Fire suppression by low-volatile chemically active fire suppressants using aerosol technology, *Fire Safety Journal*, Volume 51, 2012, Pages 102-109, ISSN 0379-7112, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2012.04.003>.

85. Kroca D., Klouda K. Application of aerosol extinguishing agents to increase infrastructure safety. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2020. – Vol. 444, № 1. – Article 012030. DOI: 10.1088/1755-1315/444/1/012030.

86. Rohilla M., Saxena A., Tyagi Y. K., Singh I., Tanwar R. K., Narang R. Condensed Aerosol Based Fire Extinguishing System Covering Versatile Applications: A Review. *Fire Technology*. – 2021. – Vol. 57, № 6. – P. 2979–3005. DOI: 10.1007/s10694-021-01105-9.

87. Zhou X., Zhang Y., Wang J. Experimental study on extinguishing mechanism of condensed aerosol fire suppression agents. *Fire Safety Journal*. – 2019. – Vol. 108. – Article 102889. DOI: 10.1016/j.firesaf.2019.102889.

88. Balanyuk V., Myroshkin V., Kopystinsky Y., Garasimiuk O., Girskiy O., Gyzar N. Study of Efficiency Parameters for Using Fire-Extinguishing Aerosols to Suppress

Flammable Liquid Fires in Open Spaces. *Key Engineering Materials*. 2025. Vol. 1020. P. 141–151. DOI: 10.4028/p-7xOPiH.

89. Баланюк В. М., Гірський О. І. Поширення вогнегасних аерозолів в об'ємі. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2026. № 2(300). С. 75–81. DOI: 10.33216/1998-7927-2026-300-2-75-81.

90. Butler K. M., Mulholland G. W. Generation and Transport of Smoke Components. *Fire Technology*. – 2004. – Vol. 40, № 2. – P. 149–176. DOI: 10.1023/B:FIRE.0000016841.07530.64.

91. Elperin T., Kleorin N., Rogachevskii I. Mechanisms of formation of aerosol and gaseous inhomogeneities in the turbulent atmosphere. *Atmospheric Research*. – 2000. – Vol. 53, Issues 1–3. – P. 117–129. DOI: 10.1016/S0169-8095(99)00043-5.

92. Баланюк В. М., Гірський О. І. Застосування ударних хвиль для підвищення ефективності об'ємного пожежогасіння : розділ монографії. 2025.

93 Gehandler J., Lönnermark A. Uneven exposure of compressed natural gas (CNG) and hydrogen (H₂) cylinders: Fire and extinguishment tests. *Fire Safety Journal*. – 2024. – Vol. 146. – Article 104170. DOI: 10.1016/j.firesaf.2024.104170.

94. Guo L., Du H., Cui X., Zhang J., Wang K., Wu J., Guo H. Research progress and prospects of CO₂ fire prevention and extinguishing technology in mine goafs. *Thermochimica Acta*. – 2025. – Vol. 747. – Article 179977. DOI: 10.1016/j.tca.2025.179977.

95. Wang M., Wen X., Yuan Z., Deng H., Song J., Chen G., Wang F., Pan R. Experimental study of the combined effects of CO₂ and obstacles on the explosive behavior of syngas. *Fire Safety Journal*. – 2025. – Vol. 153. – Article 104355. DOI: 10.1016/j.firesaf.2025.104355.

96. Zhang L., Li Y., Duan Q., Chen M., Xu J., Zhao C., Sun J., Wang Q. Experimental study on the synergistic effect of gas extinguishing agents and water mist on suppressing lithium-ion battery fires. *Journal of Energy Storage*. – 2020. – Vol. 32. – Article 101801. DOI: 10.1016/j.est.2020.101801.

97. Hinds, William C., and Yifang Zhu. *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*. John Wiley & Sons, 2022. [Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles](#)
98. _____
99. Hong-Zeng Yu, Xiangyang Zhou, Enclosure fire extinguishment with water mist and nitrogen as affected by fire size, obstruction and ventilation, *Fire Safety Journal*, Volume 142, 2024, 104051, ISSN 0379-7112, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.104051>.
100. Azad Hamzhepour, Vittorio Verda, Romano Borchiellini, Experimental study of extinguishing shielded fires by a low-pressure multi-orifice water mist nozzle, *Fire Safety Journal*, Volume 146, 2024, 104175, ISSN 0379-7112, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2024.104175>.
101. H.R. Baum, R.G. Rehm, G.W. Mulholland, Prediction of heat and smoke movement in enclosure fires, *Fire Safety Journal*, Volume 6, Issue 3, 1983, Pages 193-201, ISSN 0379-7112, [https://doi.org/10.1016/0379-7112\(83\)90070-X](https://doi.org/10.1016/0379-7112(83)90070-X).
102. Kuldeep Prasad, Gopal Patnaik, K. Kailasanath, A numerical study of water-mist suppression of large scale compartment fires, *Fire Safety Journal*, Volume 37, Issue 6, 2002, Pages 569-589, ISSN 0379-7112, [https://doi.org/10.1016/S0379-7112\(02\)00004-8](https://doi.org/10.1016/S0379-7112(02)00004-8).
103. Chan Kim, Hong Sun Ryou, An experimental and numerical study on fire suppression using a water mist in an enclosure, *Building and Environment*, Volume 38, Issue 11, 2003, Pages 1309-1316, ISSN 0360-1323, [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(03\)00134-3](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(03)00134-3).
104. Fitkau, I., Hartmann, T. An ontology-based approach of automatic compliance checking for structural fire safety requirements. *Advanced Engineering Informatics*, Volume 59, 2024, 102314. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2023.102314>
105. Duc-Tho Pham, Minh Ngoc Vu, Hung Truong Trieu, Truong Son Bui, Trung Nguyen-Thoi, A thermo-mechanical mesoscale lattice model to describe the transient thermal strain and to predict the attenuation of thermo-mechanical properties at

- elevated temperature up to 800 °C of concrete, *Fire Safety Journal*, Volume 114, 2020, 103011, ISSN 0379-7112, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103011>.
106. Hewson J., Tieszen S. *CFD Modeling of Fire Suppression and Its Role in Optimizing Suppressant Distribution*, NIST, 2003. <https://www.nist.gov/publications/cfd-modeling-fire-suppression-and-its-role-optimizing-suppressant-distribution>
107. Liang T. et al. *Fire Extinguishing in Tunnel Space*, 2013, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.444-445.1555>
108. McGrattan, K. et al. *Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide*. NIST, 2020. <https://www.govinfo.gov/content/pkg/GOVPUB-C1378300e8b6d53421a1d1719a7a5b60ffd/pdf/GOVPUB-C1378300e8b6d53421a1d1719a7a5b60ffd.pdf>
109. Sebastian Festag, False alarm ratio of fire detection and fire alarm systems in Germany – A meta analysis, *Fire Safety Journal*, Volume 79, 2016, Pages 119-126, ISSN 0379-7112, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2015.11.010>.
110. David Božiček, Roman Kunič, Mitja Košir, Interpreting environmental impacts in building design: Application of a comparative assertion method in the context of the EPD scheme for building products, *Journal of Cleaner Production*, Volume 279, 2021, 123399, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123399>.
111. Margaret McNamee, Therése Göras, Axel Mossberg, Cecilia Wetterqvist, Karolina Lundh, Per Blomqvist, Susanne Blomqvist, Challenges and opportunities for reuse of products and materials with fire safety requirements – A Swedish perspective, *Fire Safety Journal*, Volume 140, 2023, 103857, ISSN 0379-7112, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103857>.
112. Scheuermann, K., Bohm, S., Gernert, S., Kettner, C. Development of solid propellant for the production of fire suppression aerosols. *Fire Safety Journal*, Volume 115, 2020, 103011. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103011>
113. Unit, C., Rowland, B., Benson, C. Economic analysis of fire and rescue service activities: A scoping review. *Fire Safety Journal*, Volume 152, 2025, 104289. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2025.104289>

Додатки

Додаток А

Список публікацій здобувача.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у міжнародних наукових виданнях і тих, що входять до міжнародних наукометричних баз (МНБ):

1. V.Balanyuk, V.Myroshkin, Y.Kopystinsky, O.Garasimiuk, O.Girskiy, N. Gyzar «Study of Efficiency Parameters for Using Fire-Extinguishing Aerosols to Suppress Flammable Liquid Fires in Open Spaces» Key Engineering Materials (Volume 1020) Publisher in Materials Science § Engineering Trans Tech Publications Ltd (Zurich, Switzerland) August 2025, 141-151, DOI: 10.4028/p-7xOPiH.

Статті у наукових фахових виданнях України:

2. Баланюк В. М., Гірський О. І., Гарасим'юк О. І., Мирошкін В. С., Пикус В. С. Проблеми нормативно-технічного забезпечення випробувань та якості продукції вогнегасних систем та засобів в Україні. Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. 2022. № 26. С. 67-72. DOI: 10.32447/20784643.26.2022.08.

3. Баланюк В. М., Мирошкін В. С., Копистинський Ю. О., Гірський О. І., Гарасим'юк О. І. Порівняння вогнегасних речовин для гасіння пожеж легкозаймистих та горючих рідин. Збірник наукових праць «Пожежна безпека». 2022. № 41. С. 12-19. DOI: 10.32447/20786662.41.2022.02.

4. Баланюк В. М., Мирошкін В. С., Гузар Н. І., Пикус В. С., Гірський О. І., Чинники впливу на швидкість горіння сполук, із яких утворюються вогнегасні аерозолі. Збірник наукових праць «Пожежна безпека». 2024. № 45. С. 5-9. DOI: 10.32447/20786662.45.2024.01.

5. Баланюк В. М., Гірський О. І., Іващишин О.М. Дослідно-випробувальна база засобів об'ємного гасіння в Україні. Вісник Львівського державного

університету безпеки життєдіяльності. 2025. № 32. С. 148-154. DOI: 10.32447/20784643.32.2025.12.

6. Баланюк В. М., Гірський О. І. Поширення вогнегасних аерозолів в об'ємі. Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. 2026. № 2(300). С. 75-81, DOI: 10.33216/1998-7927-2026-300-2-75-81.

7. Баланюк В. М., Гірський О. І. 2 Розділ Монографії «Застосування ударних хвиль для підвищення ефективності об'ємного пожежогасіння», 2025.

Додаток Б

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. Баланюк В.М., Гарасим'юк О.І., Копистинський Ю.О., Пастухов П.В., Мірошкін В.С., Гірський О.І. Умови та перспективи застосування вогнегасного аерозолю для гасіння пожеж на об'єктах підвищеної небезпеки. Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення : зб. наук. праць Всеукр. наук.-практ. конф. з міжнар. участю (Львів, 2022 р.). Львів : ЛДУ БЖД, 2022. С. 291–295. URL: <https://sci.ldubgd.edu.ua/jspui/handle/123456789/13223>.

9. Баланюк В. М., Гірський О. І., Мірошкін В. С., Пикус В. В. Щодо питання визначення характеристик вогнегасних засобів в Україні. Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій : матеріали XIV Міжнар. наук.-практ. конф. (Черкаси, 27–28 квіт. 2023 р.). Черкаси : ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2023. С. 127–129. URL: nuczu.edu.ua.

10. Баланюк В. М., Мірошкін В. С., Гузар Н. І., Гарасим'юк О. І., Гірський О. І. Перспектива гасіння розливів горючих рідин об'ємними засобами пожежогасіння. Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій : матеріали XV Міжнар. наук.-практ. конф. (Черкаси, 25–26 квіт. 2024 р.). Черкаси : ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2024. С. 7–8.

11. Баланюк В. М., Мірошкін В. С., Гузар Н. І., Гарасим'юк О. І., Гірський О. І. Аналіз ефективності гасіння пожеж на відкритих електричних підстанціях. Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій : матеріали XV Міжнар. наук.-практ. конф. (Черкаси, 25–26 квіт. 2024 р.). Черкаси : ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2024. С. 8–9. URL: ldubgd.edu.ua.

12. Баланюк В. М., Гузар Н. І., Мірошкін В. С., Пикус С., Гірський О. І. Небезпечні сценарії розвитку пожеж в умовах війни. Цивільний захист в умовах війни : зб. тез доповідей I Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Львів, 17–18 квіт. 2025 р.). Львів : ЛДУ БЖД, 2025. С. 139–140.

13. Баланюк В. М., Гузар Н. І., Мирошкін В. С., Пикус С., Гірський О. І. Небезпечні чинники пожеж на трансформаторних підстанціях в умовах війни: зб. тез доповідей I Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Львів, 17–18 квіт. 2025 р.). Львів : ЛДУ БЖД, 2025. С. 140-142.

Додаток В. Протокол дослідження

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності
Науково-дослідна лабораторія пожежної безпеки
Навчально-наукового інституту пожежної та техногенної безпеки

Свідоцтво про атестацію № РЛ 032/25 чинне до 17 червня 2029 р.
Ліцензія ДДПБ МНС України серія АГ № 506341 від 11.02.2011 р

ПРОТОКОЛ № 05/318/2026

З ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГАСІННЯ АЕРОЗОЛЕМ ТА ВУГЛЕКИСЛИМ ГАЗОМ
В ГЕОМЕТРИЧНО СКЛАДНИХ ОБМЕЖЕНИХ ОБ'ЄМАХ

Львів 2026



ПРОТОКОЛ № 05/318/2026
З ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГАСІННЯ АЕРОЗОЛЕМ ТА ВУГЛЕКИСЛИМ ГАЗОМ
В ГЕОМЕТРИЧНО СКЛАДНИХ ОБМЕЖЕНИХ ОБ'ЄМАХ

Дата проведення випробувань: 10.02.2026 р.

Умови проведення випробувань:
- температура 18 °С
- атмосферний тиск 98,5 кПа
- відносна вологість 60 %

МІСЦЕ ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ: Науково-дослідна лабораторія пожежної безпеки ЛДУ БЖД.

Адреса: м. Львів, вул. Клепарівська, 35.

ЗАМОВНИК ВИПРОБУВАНЬ:

Аспірант Олег ГІРСЬКИЙ в рамках виконання освітньо-наукової програми спеціальності «Пожежна безпека».

ОБ'ЄКТ ВИПРОБУВАНЬ:

Ефективність гасіння аерозолем та вуглекислим газом в геометрично складних обмежених об'ємах.

ВРАЗКИ ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ: Аерозольотворююча сполука АУСЗ, вуглекислотний вогнегасник ВВ-2.

МЕТА ВИПРОБУВАНЬ: визначення ефективності гасіння аерозольотворюючою сполукою АУСЗ та діоксидом вуглецю в геометрично складних обмежених об'ємах.

ОБЛАДНАННЯ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ:

Вогнегасник ВВ-2, АУСЗ- 100 грамів, тигель для спалювання АУС та тигель для спалювання н-гептану об'ємом 250 мл.

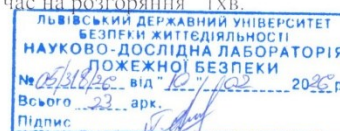
Засоби вимірювальної техніки

Таблиця 1

№ п/п	Назва і тип ЗВТ	Межі вимірювань	Клас точності, ціна поділки
1	Тигель	0,6×0,6×0,3(0,36 м ³)	-
2	Секундомір СОП	від 0 до 3600 с	2кл
3	Ваги ТВЕ 24-05	Від 0.5 до 24000.0 г	±500 мг
4	Ваги ТВЕ 150	Від 0.01 до 150.0 кг	±10000 мг

МЕТОДИКА ВИПРОБУВАНЬ Методика полягає у наступному. Камера об'ємом 0,5 м³ розміром 2х0,5х0,5 м поділяється на три рівних відсіки перегородками з ДСП товщиною 10 мм та розмірами 1-0,5х0,2м; 2-0,5х0,3м; 3-0,5х0,4м. В кожному відсіку встановлювався тигель з н-гептаном об'ємом 100 мл. Дослід з визначення ефективності поширення об'ємного вогнегасного засобу в зазначеній камері проводився наступним чином:

1. Одночасно підпалювали тиглі з н-гептаном та давався час на розгоряння 1хв.



2. Після зазначеного часу підпалювали 12,5 г АУСЗ та закривали герметично двері камери.
3. Фіксували час гасіння у першому, другому та третьому відсіках.

Щоб розпалити тигель та АУСЗ для підпалу використовували газовий паливник з кінетичним подум'ям.

Процедура проведення випробування.

З метою визначення ефективності поширення вогнегасного засобу об'ємної дії в камері було встановлено перегородки, тиглі та АУСЗ у наступному порядку:

1. У вказаній вище горизонтальній камері встановлюється одна мала перегородка 0,2*0,5м, посередині, біля стінки камери, два тиглі з н-гептаном розміщувались по різні боки від перегородки, АУСЗ розміщувався біля ближньої стінки камери, рисунок 1.

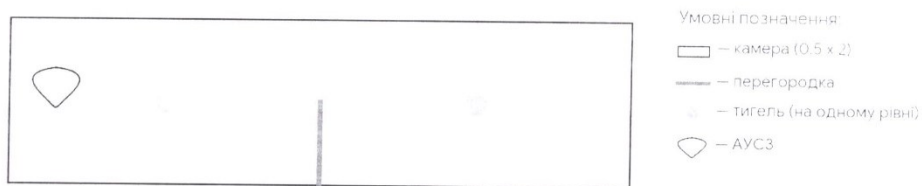


Рис.1

2. У вказаній вище горизонтальній камері встановлюється одна середня перегородка 0,3*0,5м, посередині, біля стінки камери, два тиглі з н-гептаном розміщувались по різні боки від перегородки, АУСЗ розміщувався біля ближньої стінки камери, рисунок 2.

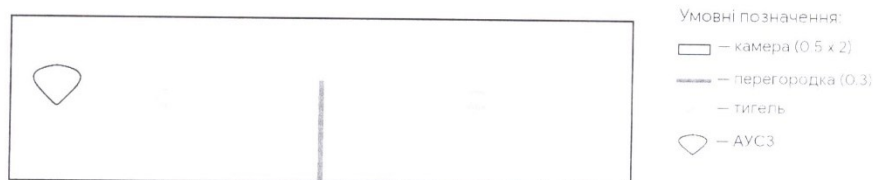


Рис.2

3. У вказаній вище горизонтальній камері встановлюється одна велика перегородка 0,4*0,5м, посередині, біля стінки камери, два тиглі з н-гептаном розміщувались по різні боки від перегородки, АУСЗ розміщувався біля ближньої стінки камери, рисунок 3.



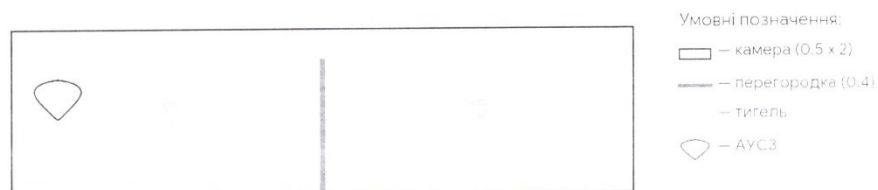


Рис.3

4. У вказаній вище горизонтальній камері три зазначені перегородки встановлювались від більшої до меншої у сторону дальньої стінки камери, впритул до однієї стінки камери, три тиглі з н-гептаном розміщувались за перегородками, АУСЗ розміщувався біля ближньої стінки камери, рисунок 4.

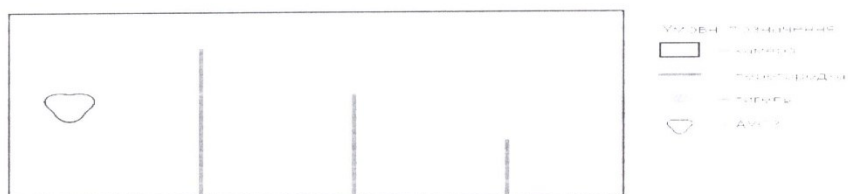


Рис.4

5. У вказаній вище горизонтальній камері три зазначені перегородки встановлювались від меншої до більшої у сторону дальньої стінки камери, впритул до однієї стінки камери, три тиглі з н-гептаном розміщувались за перегородками, АУСЗ розміщувався біля ближньої стінки камери, рисунок 5.

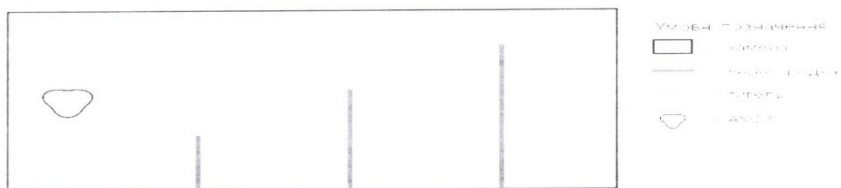
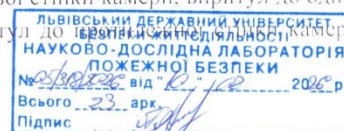


Рис.5

6. У вказаній вище горизонтальній камері три зазначені перегородки встановлювались у шахматному порядку від меншої до більшої у сторону дальньої стінки камери, впритул до однієї стінки, при цьому середня перегородка встановлюється впритул до ближньої стінки камери.



три тиглі з н-гептаном розміщувались за перегородками, АУСЗ розміщувався біля ближньої стінки камери, рисунок 6.

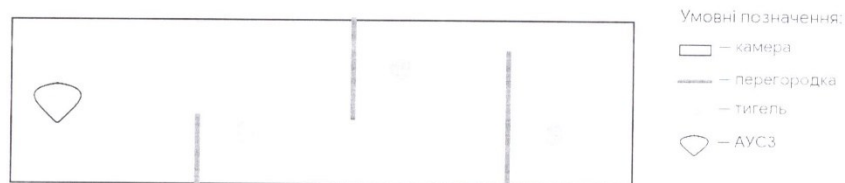


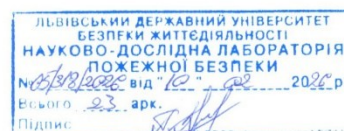
Рис.6

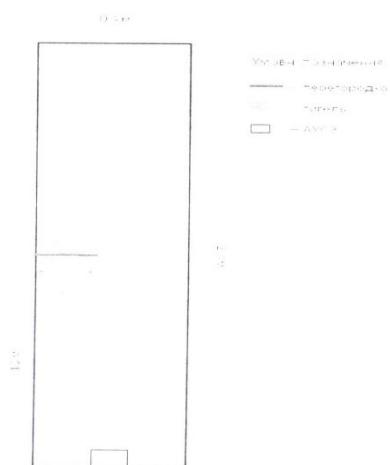
7. У вказаній вище горизонтальній камері три зазначені перегородки встановлювались у шахматному порядку від більшої до меншої у сторону дальньої стінки камери, впритул до однієї стінки, при цьому середня перегородка встановлюється впритул до протилежної стінки камери, три тиглі з н-гептаном розміщувались за перегородками, АУСЗ розміщувався біля ближньої стінки камери, рисунок 7.



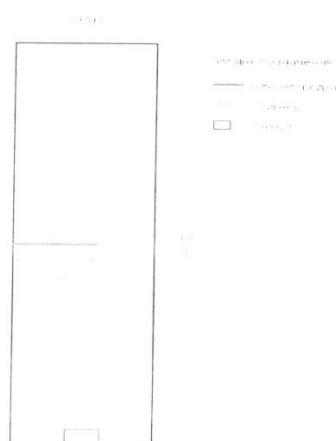
Рис.7

8. У вказаній вертикальній камері встановлюється одна мала перегородка 0,2*0,5м, посередині, біля стінки камери, впритул до однієї стінки камери, тигель з н-гептаном розміщували на перегородці, АУСЗ розміщувався в низу камери, рисунок 8.





9. У вказаній вертикальній камері встановлюється одна середня перегородка 0,3*0,5м, посередині, біля стінки камери, впритул до однієї стінки камери, тигель з n-гептаном розміщували на перегородці, АУСЗ розміщувався в низу камери, рисунок 9.



10. У вказаній вертикальній камері встановлюється одна велика перегородка 0,4*0,5м, посередині, біля стінки камери, впритул до однієї стінки камери, тигель з n-гептаном розміщували на перегородці, АУСЗ розміщувався в низу камери, рисунок 10.

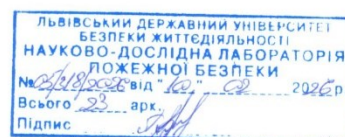




Рис.10

11. У вказаній вертикальній камері три зазначені перегородки встановлювались від більшої до меншої у сторону верхньої стінки камери, впритул до однієї стінки камери, три тіглі з н-гептаном розміщувались на перегородках, АУСЗ розміщувався в низу камери, рисунок 11.

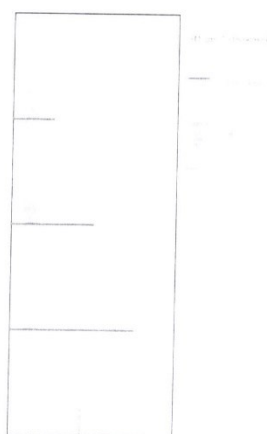


Рис. 11

12. У вказаній вертикальній камері три зазначені перегородки встановлювались від меншої до більшої у сторону верхньої стінки камери, впритул до однієї стінки камери, три тіглі з н-гептаном розміщувались на перегородках, АУСЗ розміщувався в низу камери, рисунок 12.



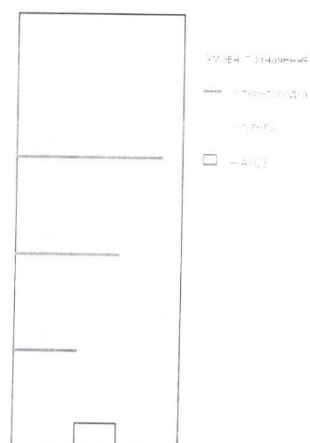


Рис.12

13. У вказаній вертикальній камері три зазначені перегородки встановлювались у шахматному порядку від більшої до меншої у сторону верхньої стінки камери, впритул до однієї стінки, при цьому середня перегородка встановлюється впритул до протилежної стінки камери, три тиглі з н-гептаном розміщувались на перегородках, АУСЗ розміщувався в низу камери, рисунок 13.

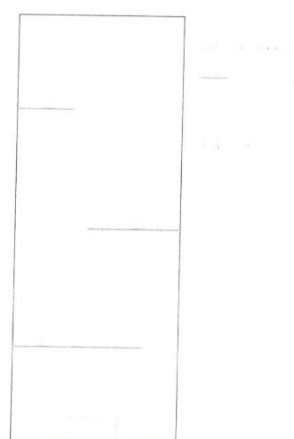
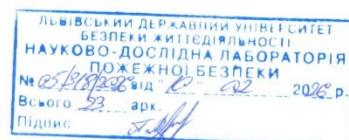


Рис.13

14. У вказаній вертикальній камері три зазначені перегородки встановлювались у шахматному порядку від меншої до більшої у сторону верхньої стінки камери, впритул до однієї стінки, при цьому середня перегородка встановлюється впритул до протилежної стінки камери, три тиглі з н-гептаном розміщувались на перегородках, АУСЗ розміщувався в низу камери, рисунок 14.



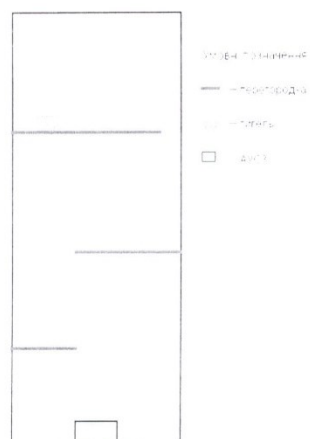


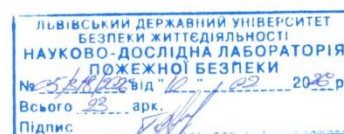
Рис.14

15. У вказаній вертикальній камері три зазначені перегородки встановлювались від більшої до меншої у сторону верхньої стінки камери, впритул до однієї стінки камери, три тиглі з н-гептаном розміщувались на перегородках, АУСЗ розміщувався зверху камери, рисунок 15.



Рис.15

16. У вказаній вертикальній камері три зазначені перегородки встановлювались від меншої до більшої у сторону верхньої стінки камери, впритул до однієї стінки камери, три тиглі з н-гептаном розміщувались на перегородках, АУСЗ розміщувався зверху камери, рисунок 16.



РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАНЬ:
ЕФЕКТИВНІСТЬ ГАСІННЯ В ГЕОМЕТРИЧНО
СКЛАДНИХ ОБМЕЖЕНИХ ОБ'ЄМАХ ВОГНЕГАСНИМ АЕРОЗОЛЕМ

Таблиця 2

№	Вид вогнегасної речовини	Кількість та розмір перегородки і місце встановлення	Час гасіння тиглів с.	Примітка
1	Аерозоль	Одна мала перегородка 0,2*0,5м, посередині, біля стінки	1 тиг -6 2 тиг - 12	Відбулось інтенсивне перемішування та розподілення аерозольної хмари в верхній частині.
1.1	Аерозоль	Одна мала перегородка 0,2*0,5м, посередині, біля стінки	1 тиг -8 2 тиг- 12	Відбулось інтенсивне перемішування та розподілення аерозольної хмари в верхній частині.
2	Аерозоль	Одна середня перегородка 0,3*0,5м посередині, біля стінки	1 тиг -7 2 тиг - 18	Спостерігалось інтенсивне перемішування та розподілення аерозолу навіть після гасіння.
2.1	Аерозоль	Одна середня перегородка 0,3*0,5м посередині, біля стінки	1 тиг -7 2 тиг - 19	Спостерігалось інтенсивне перемішування та розподілення аерозолу навіть після гасіння.
3	Аерозоль	Одна велика перегородка 0,4*0,5м посередині, біля стінки	1 тиг - 8 2 тиг - 23	Спостерігалось менш інтенсивне перемішування розподілення аерозолу.
3.1	Аерозоль	Одна велика перегородка 0,4*0,5м посередині, біля стінки	1 тиг - 7 2 тиг - 17	Спостерігалось менш інтенсивне перемішування розподілення аерозолу.
4	Аерозоль	Послідовно розташовані три перегородки від великої до малої	1 тиг - 18 2 тиг - 21 3 тиг - 25	Спостерігалось інтенсивне перемішування аерозолу через верхню частину приміщення навіть після гасіння.
4.1	Аерозоль	Послідовно розташовані три перегородки від великої до малої	1 тиг - 18 2 тиг - 20 3 тиг - 26	Спостерігалось інтенсивне перемішування аерозолу через верхню частину приміщення навіть після гасіння.
5	Аерозоль	Послідовно розташовані три перегородки від малої до великої	1 тиг -7 2 тиг - 10 3 тиг - 35	Спостерігалось інтенсивне перемішування аерозолу через верхню частину приміщення. Після гасіння 2 тигля гасіння 3 тигля відбулось значно пізніше через 55 секунд. Фото 2 (2.1-2.3)
5.1	Аерозоль	Послідовно розташовані три перегородки від малої до великої	1 тиг -6 2 тиг - 11 3 тиг - 37	Спостерігалось інтенсивне перемішування аерозолу через верхню частину приміщення. Після гасіння 2 тигля гасіння 3 тигля відбулось значно пізніше через 55 секунд. Фото 2 (2.1-2.3)

Львівський державний університет
 безпеки життєдіяльності
НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЛАБОРАТОРІЯ
ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ
 № 5/2015/2026 від " 12 " 02 2016 р.
 Всього 23 арк.
 Підпис *[Підпис]*

				відбулось значно пізніше через 55 секунд. Фото 2 (2.1-2.3)
6.	Аерозоль	Три перегородки виставлені у шахматному порядку від меншої до більшої	1 тиг - 5 2 тиг - 10 3 тиг - 32	Спостерігалось інтенсивне перемішування аерозолу через верхню частину приміщення. Шахматне розташування перегородок від меншої до більшої забезпечило відносно швидке поширення аерозольної хмари — гасіння відбувалось послідовно з невеликими інтервалами між тиглями.
6.1	Аерозоль	Три перегородки виставлені у шахматному порядку від меншої до більшої	1 тиг - 6 2 тиг - 9 3 тиг - 30	Спостерігалось інтенсивне перемішування аерозолу через верхню частину приміщення. Шахматне розташування перегородок від меншої до більшої забезпечило відносно швидке поширення аерозольної хмари — гасіння відбувалось послідовно з невеликими інтервалами між тиглями.
7.	Аерозоль	Три перегородки виставлені у шахматному порядку від більшої до меншої	1 тиг - 16 2 тиг - 21 3 тиг - 26	Спостерігалось інтенсивне перемішування аерозолу через верхню частину приміщення. Час гасіння тиглів був рівномірно розподілений між відеками, що свідчить про стабільне послідовне проникнення аерозольної хмари через шахматно розташовані перегородки.
7.1	Аерозоль	Три перегородки виставлені у шахматному порядку від більшої до меншої	1 тиг - 16 2 тиг - 21 3 тиг - 26	Спостерігалось інтенсивне перемішування аерозолу через верхню частину приміщення. Час гасіння тиглів був рівномірно розподілений між відеками, що свідчить про стабільне послідовне проникнення аерозольної хмари через шахматно розташовані перегородки.
8	Аерозоль	У вертикальній камері одна мала перегородка 0,2*0,5м, посередині, біля стінки	1 тиг - 8	Спостерігалось швидке заповнення об'єму аерозолом завдяки конвективним потокам від вогнища. Мала

Львівський державний університет
"Підприємство" Львів
НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЛАБОРАТОРІЯ
ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ
№ 01/2024 від "12" "09" 2024 р.
Всього 2 арк.
Підпис

				суттєвого опору поширенню аерозолу у вертикальному об'ємі, що забезпечило швидке гасіння.
8.1	Аерозоль	У вертикальній камері одна мала перегородка 0,2*0,5м, посередині, біля стінки	1 тиг - 7	Спостерігалось швидке заповнення об'єму аерозолем завдяки конвективним потокам від вогнища. Мала перегородка не створювала суттєвого опору поширенню аерозолу у вертикальному об'ємі, що забезпечило швидке гасіння.
9	Аерозоль	У вертикальній камері одна середня перегородка 0,3*0,5м, посередині, біля стінки	1 тиг - 9	Спостерігалось поступове заповнення об'єму аерозолем. Середня перегородка дещо уповільнила поширення аерозольної хмари порівняно з малою, однак конвективні потоки сприяли її подоланню та формуванню вогнегасної концентрації.
9.1	Аерозоль	У вертикальній камері одна середня перегородка 0,3*0,5м, посередині, біля стінки	1 тиг - 9	Спостерігалось поступове заповнення об'єму аерозолем. Середня перегородка дещо уповільнила поширення аерозольної хмари порівняно з малою, однак конвективні потоки сприяли її подоланню та формуванню вогнегасної концентрації.
10	Аерозоль	У вертикальній камері одна велика перегородка 0,4*0,5м, посередині, біля стінки	1 тиг - 16	Спостерігалось сповільнене поширення аерозолу через зменшення площі вільного перерізу. Велика перегородка суттєво обмежувала конвективне перенесення аерозольної хмари, що призвело до збільшення часу гасіння порівняно з малою та середньою перегородками
10.1	Аерозоль	У вертикальній камері одна велика перегородка 0,4*0,5м, посередині, біля стінки	1 тиг - 14	Спостерігалось сповільнене поширення аерозолу через зменшення площі вільного перерізу. Велика перегородка суттєво обмежувала конвективне перенесення аерозольної хмари, що призвело до збільшення часу гасіння та

Підпис: *[Підпис]*
 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЛАБОРАТОРІЯ
 ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ
 № 318/2020 від "19" 02 2020р.
 Всього 23 арк.
 Підпис: *[Підпис]*

				середньою перегородками
11	Аерозоль	У вертикальній камері три зазначені перегородки встановлювались від більшої до меншої у сторону верхньої стінки камери	1 тиг - 24 2 тиг - 28 3 тиг - 32	Спостерігалось поступове проникнення аерозолу через перегородки завдяки висхідним конвективним потокам. Розташування від більшої до меншої перегородки у напрямку вгору створювало помірний опір, що забезпечило послідовне, але сповільнене гасіння всіх трьох тиглів
11.1	Аерозоль	У вертикальній камері три зазначені перегородки встановлювались від більшої до меншої у сторону верхньої стінки камери	1 тиг - 24 2 тиг - 29 3 тиг - 31	Спостерігалось поступове проникнення аерозолу через перегородки завдяки висхідним конвективним потокам. Розташування від більшої до меншої перегородки у напрямку вгору створювало помірний опір, що забезпечило послідовне, але сповільнене гасіння всіх трьох тиглів
12	Аерозоль	У вертикальній камері три зазначені перегородки встановлювались від меншої до більшої у сторону верхньої стінки камери	1 тиг - 9 2 тиг - 17 3 тиг - 25	Спостерігалось відносно швидке гасіння першого та другого тиглів завдяки меншому початковому опору перегородок. Найбільша верхня перегородка суттєво затримувала поширення аерозолу до третього тигля, проте конвективні потоки врешті забезпечили формування вогнегасної концентрації.
12.1	Аерозоль	У вертикальній камері три зазначені перегородки встановлювались від меншої до більшої у сторону верхньої стінки камери	1 тиг - 9 2 тиг - 18 3 тиг - 29	Спостерігалось відносно швидке гасіння першого та другого тиглів завдяки меншому початковому опору перегородок. Найбільша верхня перегородка суттєво затримувала поширення аерозолу до третього тигля, проте конвективні потоки врешті забезпечили формування вогнегасної концентрації.
13	Аерозоль	У вертикальній камері три зазначені перегородки встановлювались у шахматному порядку від більшої до меншої у сторону верхньої стінки камери	1 тиг - 28 2 тиг - 36 3 тиг - 39	Спостерігалось значне сповільнення поширення аерозолу через складну шахматну конфігурацію перегородок. Великі початкові перегородки



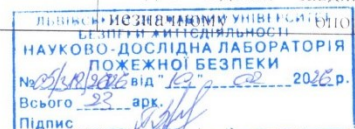
				висхідний рух аерозольної хмари, що призвело до найдовшого часу гасіння серед усіх конфігурацій вертикальної камери.
13.1	Аерозоль	У вертикальній камері три зазначені перегородки встановлювались у шахматному порядку від більшої до меншої у сторону верхньої стінки камери	1 тиг - 28 2 тиг - 36 3 тиг - 40	Спостерігалось значне сповільнення поширення аерозолі через складну шахматну конфігурацію перегородок. Великі початкові перегородки суттєво обмежували висхідний рух аерозольної хмари, що призвело до найдовшого часу гасіння серед усіх конфігурацій вертикальної камери.
14	Аерозоль	У вертикальній камері три зазначені перегородки встановлювались у шахматному порядку від меншої до більшої у сторону верхньої стінки камери	1 тиг - 8 2 тиг - 12 3 тиг - 55	Спостерігалось швидке гасіння першого тигля завдяки незначному початковому опору малої перегородки. Однак велика верхня перегородка у шахматному розташуванні практично повністю блокувала подальше поширення аерозолі, внаслідок чого гасіння другого та третього тиглів не відбулось протягом часу спостереження.
14.1	Аерозоль	У вертикальній камері три зазначені перегородки встановлювались у шахматному порядку від меншої до більшої у сторону верхньої стінки камери	1 тиг - 9 2 тиг - 11 3 тиг - 59	Спостерігалось швидке гасіння першого тигля завдяки незначному початковому опору малої перегородки. Однак велика верхня перегородка у шахматному розташуванні практично повністю блокувала подальше поширення аерозолі, внаслідок чого гасіння другого та третього тиглів не відбулось протягом часу спостереження.
15	Аерозоль	У вертикальній камері три зазначені перегородки встановлювались від більшої до меншої у сторону верхньої стінки камери	1 тиг - 9 2 тиг - 18 3 тиг - не загасив	Подача аерозолі зверху не забезпечила ефективного гасіння всіх тиглів, третій тигель не загасив через протидію конвективних потоків від вогнища, які перешкоджали проникненню аерозолі вниз.
15.1	Аерозоль	У вертикальній камері три	1 тиг - 8	Підписаний дослідження виконано з метою забезпечення безпеки життєдіяльності НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЛАБОРАТОРІЯ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ № 10 від "10" "02" 2022 р. Всього 23 арк. Підпис

		зазначені перегородки встановлювались від більшої до меншої у сторону верхньої стінки камери	2 тиг- 19 3 тиг –не загасив	забезпечила ефективного гасіння всіх тиглів, третій тигель не загасив через протидію конвективних потоків від вогнища, які перешкождали проникненню аерозолу вниз.
16	Аерозоль	У вертикальній камері три зазначені перегородки встановлювались від меншої до більшої у сторону верхньої стінки камери	1 тиг - 6 2 тиг- не загасив 3 тиг –не загасив	Подача аерозолу зверху виявилась найменш ефективною конфігурацією, гасіння відбулось лише для першого тигля, розташованого найближче до місця подачі, другий та третій тиглі не загасили через протидію конвективних потоків від вогнища.
16.1	Аерозоль	У вертикальній камері три зазначені перегородки встановлювались від меншої до більшої у сторону верхньої стінки камери	1 тиг - 5 2 тиг- не загасив 3 тиг –не загасив	Подача аерозолу зверху виявилась найменш ефективною конфігурацією, гасіння відбулось лише для першого тигля, розташованого найближче до місця подачі, другий та третій тиглі не загасили через протидію конвективних потоків від вогнища

ЕФЕКТИВНІСТЬ ГАСІННЯ В ГЕОМЕТРИЧНО
СКЛАДНИХ ОБМЕЖЕНИХ ОБ'ЄМАХ ДІОКСИДОМ ВУГЛЕЦЮ

Таблиця 3

№	Вид вогнегасної речовини	Кількість та розмір перегородки і місце встановлення	Час гасіння тиглів с.	Примітка
1	Діоксид вуглецю	Одна мала перегородка 0,2*0,5м, посередині, біля стінки	1 тиг - 32 2 тиг – 45	Спостерігалось інтенсивне перемішування та швидке поширення CO ₂ в об'ємі. Газ рівномірно заповнив обидва відсіки завдяки незначному опору перегородки.
1.1	Діоксид вуглецю	Одна мала перегородка 0,2*0,5м, посередині, біля стінки	1 тиг – 34 2 тиг – 52	Спостерігалось інтенсивне перемішування та швидке поширення CO ₂ в об'ємі. Газ рівномірно заповнив обидва відсіки завдяки



16

				перегородки.
2	Діоксид вуглецю	Одна середня перегородка 0,3*0,5м посередині, біля стінки	1 тиг – 36 2 тиг – 54	Спостерігалось інтенсивне перемішування CO ₂ , однак час гасіння суттєво зріс порівняно з малою перегородкою через збільшення опору поширенню газу.
2.1	Діоксид вуглецю	Одна середня перегородка 0,3*0,5м посередині, біля стінки	1 тиг – 32 2 тиг – 52	Спостерігалось інтенсивне перемішування CO ₂ , однак час гасіння суттєво зріс порівняно з малою перегородкою через збільшення опору поширенню газу.
3	Діоксид вуглецю	Одна велика перегородка 0,4*0,5м посередині, біля стінки	1 тиг - 29 2 тиг - 50	Спостерігалось сповільнене поширення CO ₂ через зменшення площі вільного перерізу. Формування вогнегасної концентрації у другому відсіку відбувалось із значною затримкою.
3.1	Діоксид вуглецю	Одна велика перегородка 0,4*0,5м посередині, біля стінки	1 тиг - 33 2 тиг - 56	Спостерігалось сповільнене поширення CO ₂ через зменшення площі вільного перерізу. Формування вогнегасної концентрації у другому відсіку відбувалось із значною затримкою.
4	Діоксид вуглецю	Послідовно розташовані три перегородки від великої до малої	1 тиг - 29 2 тиг - 48 3 тиг - 62	Спостерігалось поступове проникнення CO ₂ через верхню частину приміщення. Краща конфігурація з трьох перегородок — газ поступово долав перешкоди зі зменшенням їх площі.
4.1	Діоксид вуглецю	Послідовно розташовані три перегородки від великої до малої	1 тиг - 25 2 тиг - 46 3 тиг - 64	Спостерігалось поступове проникнення CO ₂ через верхню частину приміщення. Краща конфігурація з трьох перегородок — газ поступово долав перешкоди зі зменшенням їх площі.
5	Діоксид вуглецю	Послідовно розташовані три перегородки від малої до великої	1 тиг - 15 2 тиг - 19 3 тиг - 20	Найгірше поширення CO ₂ серед усіх конфігурацій.

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності
**НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЛАБОРАТОРІЯ
 ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ**
 № 25/2022 від 19.02.2022 р.
 Всього 23 арк.
 Підпис *[підпис]*

				перегородка суттєво гальмувала накопичення газу у крайньому відсіку. Гасіння протягом часу спостереження не завершилось.
5.1	Діоксид вуглецю	Послідовно розташовані три перегородки від малої до великої	1 тиг - 15 2 тиг - 19 3 тиг - 26	Найгірше поширення CO ₂ серед усіх конфігурацій. Найбільша кінцева перегородка суттєво гальмувала накопичення газу у крайньому відсіку. Гасіння протягом часу спостереження не завершилось.
6	Діоксид вуглецю	Три перегородки виставлені у шахматному порядку від меншої до більшої	1 тиг - 16 2 тиг - 21 3 тиг - 28	Спостерігалось поступове накопичення CO ₂ у відсіках. Шахматне розташування перегородок від меншої до більшої створювало зростаючий опір поширенню газу, що призвело до послідовного, але сповільненого гасіння тиглів.
6.1	Діоксид вуглецю	Три перегородки виставлені у шахматному порядку від меншої до більшої	1 тиг - 16 2 тиг - 17 3 тиг - 23	Спостерігалось поступове накопичення CO ₂ у відсіках. Шахматне розташування перегородок від меншої до більшої створювало зростаючий опір поширенню газу, що призвело до послідовного, але сповільненого гасіння тиглів.
7	Діоксид вуглецю	Три перегородки виставлені у шахматному порядку від більшої до меншої	1 тиг - 31 2 тиг - 41 3 тиг - 49	Спостерігалось сповільнене поширення CO ₂ через складну шахматну конфігурацію. Великі початкові перегородки суттєво затримували надходження газу до суміжних відсіків, що проявилось у значних інтервалах між гасінням кожного наступного тигля.
7.1	Діоксид вуглецю	Три перегородки виставлені у шахматному	1 тиг - 34 2 тиг - 46	Спостерігалось сповільнене поширення CO ₂ через складну шахматну конфігурацію. Великі початкові перегородки суттєво затримували надходження газу до суміжних відсіків, що проявилось у значних інтервалах між гасінням кожного наступного тигля.

Львівський національний університет
 безпеки життєдіяльності
 науково-дослідна лабораторія
 пожежної безпеки
 № 5/318/2020 від "10" 2020 р.
 Всього 13 арк.
 Підпис

		порядку від більшої до меншої	3 тиг - 53	CO ₂ через складну шахматну конфігурацію. Великі початкові перегородки суттєво затримували надходження газу до суміжних відсіків, що проявилось у значних інтервалах між гасінням кожного наступного тигля.
8	Діоксид вуглецю	У вертикальній камері одна мала перегородка 0,2*0,5м, посередині, біля стінки	1 тиг - 16	Спостерігалось відносно повільне заповнення об'єму CO ₂ . Незважаючи на малий розмір перегородки, поширення газу у вертикальному об'ємі відбувалось повільніше порівняно з горизонтальною камерою через більшу густину CO ₂ та його тенденцію накопичуватись у нижніх зонах.
8.1	Діоксид вуглецю	У вертикальній камері одна мала перегородка 0,2*0,5м, посередині, біля стінки	1 тиг - 14	Спостерігалось відносно повільне заповнення об'єму CO ₂ . Незважаючи на малий розмір перегородки, поширення газу у вертикальному об'ємі відбувалось повільніше порівняно з горизонтальною камерою через більшу густину CO ₂ та його тенденцію накопичуватись у нижніх зонах.
9	Діоксид вуглецю	У вертикальній камері одна середня перегородка 0,3*0,5м, посередині, біля стінки	1 тиг - 19	Спостерігалось сповільнене поширення CO ₂ у вертикальному об'ємі. Середня перегородка у поєднанні з природним осіданням газу вниз призводила до нерівномірного розподілу концентрації CO ₂ , що дещо збільшило час гасіння порівняно з малою перегородкою.
9.1	Діоксид вуглецю	У вертикальній камері одна середня перегородка 0,3*0,5м, посередині, біля стінки	1 тиг - 18	Спостерігалось сповільнене поширення CO ₂ у вертикальному об'ємі. Середня

Львівський державний університет
 БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ
 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЛАБОРАТОРІЯ
 РОЗЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ
 № 01/18/20 від 10.02.2026р.
 Всього 23 арк.
 Підпис: [підпис]

				з природним осіданням газу вниз призводила до нерівномірного розподілу концентрації CO ₂ , що дещо збільшило час гасіння порівняно з малою перегородкою..
10	Діоксид вуглецю	У вертикальній камері одна велика перегородка 0,4*0,5м, посередині, біля стінки	1 тиг – 21	Спостерігалось найповільніше поширення CO ₂ серед конфігурації з однією перегородкою у вертикальній камері. Велика перегородка суттєво обмежувала переміщення газу між зонами, а тенденція CO ₂ до осідання додатково ускладнювала формування вогнегасної концентрації у зоні тигля.
10.1	Діоксид вуглецю	У вертикальній камері одна велика перегородка 0,4*0,5м, посередині, біля стінки	1 тиг - 20	Спостерігалось найповільніше поширення CO ₂ серед конфігурацій з однією перегородкою у вертикальній камері. Велика перегородка суттєво обмежувала переміщення газу між зонами, а тенденція CO ₂ до осідання додатково ускладнювала формування вогнегасної концентрації у зоні тигля.
11	Діоксид вуглецю	У вертикальній камері три зазначені перегородки встановлювались від більшої до меншої у сторону верхньої стінки камери	1 тиг - 36 2 тиг - 48 3 тиг - не загасило	Спостерігалось поступове гасіння першого та другого тиглів, однак третій тигель не загасило протягом часу спостереження. Сукупний опір трьох перегородок та природне осідання CO ₂ вниз не дозволили сформувати вогнегасну концентрацію у верхній частині камери.
11.1	Діоксид вуглецю	У вертикальній камері три зазначені перегородки встановлювались від більшої до меншої у сторону верхньої стінки камери	1 тиг - 32 2 тиг - 42 3 тиг - не загасило	Спостерігалось поступове гасіння першого та другого тиглів, однак третій тигель не загасило

Львівський державний університет
безпеки життєдіяльності
НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЛАБОРАТОРІЯ
ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ
№ 25/18/2020 від 17.02.2020
Всього 23 арк.
Підпис

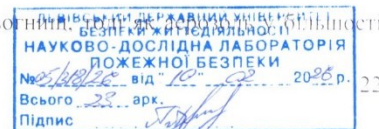
				спостереження. Сукупний опір трьох перегородок та природне оєднання CO ₂ вниз не дозволили сформувати вогнегасну концентрацію у верхній частині камери.
12	Діоксид вуглецю	У вертикальній камері три зазначені перегородки встановлювались від меншої до більшої у сторону верхньої стінки камери	1 тиг - 16 2 тиг - 45 3 тиг - 65	Спостерігалось послідовне гасіння всіх трьох тиглів із значними часовими інтервалами між ними. Наростаючий розмір перегородок поступово збільшував опір поширенню газу, однак достатній час спостереження дозволив CO ₂ досягти вогнегасної концентрації у всіх відсіках.
12.1	Діоксид вуглецю	У вертикальній камері три зазначені перегородки встановлювались від меншої до більшої у сторону верхньої стінки камери	1 тиг - 18 2 тиг - 46 3 тиг - 62	Спостерігалось послідовне гасіння всіх трьох тиглів із значними часовими інтервалами між ними. Наростаючий розмір перегородок поступово збільшував опір поширенню газу, однак достатній час спостереження дозволив CO ₂ досягти вогнегасної концентрації у всіх відсіках.
13	Діоксид вуглецю	У вертикальній камері три зазначені перегородки встановлювались у шахматному порядку від більшої до меншої у сторону верхньої стінки камери	1 тиг - 18 2 тиг - 42 3 тиг - не загасило	Спостерігалось гасіння першого та другого тиглів із значними часовими інтервалами, третій тигель не загасив. Шахматне розташування великих перегородок створювало складний лабиринтний шлях для поширення CO ₂ вгору, що у поєднанні з природним оєднанням газу унеможливило формування вогнегасної концентрації у верхній зоні.
13.1	Діоксид вуглецю	У вертикальній камері три зазначені перегородки встановлювались у шахматному порядку від більшої до меншої у	1 тиг - 21 2 тиг - 48 3 тиг - не загасило	Спостерігалось гасіння першого та другого тиглів із значними часовими інтервалами.

Львівський державний університет
безпечної життєдіяльності
НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЛАБОРАТОРІЯ
ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ
№ 10 від 10.02.2026 р.
Всього 23 арк.
Підпис

		сторону верхньої стінки камери		Шахматне розташування великих перегородок створювало складний лабиринтний шлях для поширення CO ₂ вгору, що у поєднанні з природним осіданням газу унеможливило формування вогнегасної концентрації у верхній зоні.
14	Діоксид вуглецю	У вертикальній камері три зазначені перегородки встановлювались у шахматному порядку від меншої до більшої у сторону верхньої стінки камери	1 тиг - 14 2 тиг - не загасило 3 тиг - не загасило	Спостерігалось гасіння лише першого тигля. Шахматне розташування зі зростаючою площею перегородок у поєднанні з більшою густиною CO ₂ порівняно з повітрям повністю унеможливило поширення газу до другого та третього тиглів — гасіння їх не відбулось протягом усього часу спостереження.
14.1	Діоксид вуглецю	У вертикальній камері три зазначені перегородки встановлювались у шахматному порядку від меншої до більшої у сторону верхньої стінки камери	1 тиг - 14 2 тиг - не загасло 3 тиг - не загасило	Спостерігалось гасіння лише першого тигля. Шахматне розташування зі зростаючою площею перегородок у поєднанні з більшою густиною CO ₂ порівняно з повітрям повністю унеможливило поширення газу до другого та третього тиглів — гасіння їх не відбулось протягом усього часу спостереження.

ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК:

Аерозоль утворений з АУСЗ демонструє суттєво вищу ефективність гасіння порівняно з діоксидом вуглецю в усіх досліджених конфігураціях геометрично складних обмежених об'єктів. Середній час гасіння при використанні аерозолу у горизонтальній камері з однією перегородкою становив 6–23 с, тоді як для CO₂ — 29–56 с, тобто у 2–4 рази більше. Принципова різниця полягає у механізмі поширення: аерозоль переміщується разом із конвективними потоками і здатний долати складніші геометричні перешкоди, тоді як CO₂ гравітаційно осідає і не поширюється у верхні зони вертикальної камери. У вертикальній камері при складних конфігураціях перегородок CO₂ виявився неефективним — не забезпечив гасіння всіх вогнищ.



конфігурацій забезпечував повне гасіння. На підставі отриманих результатів при проєктуванні систем об'ємного пожежогасіння у геометрично складних обмежених об'ємах рекомендується надавати перевагу аерозольним системам перед вуглекислотними при наявності внутрішніх перегородок, особливо у вертикально орієнтованих об'єктах; розміщувати джерело подачі аерозолю внизу об'єкту для використання природної конвекції; уникати конфігурацій, у яких найбільша перегородка розташована у напрямку поширення вогнегасного засобу; при шахматному розташуванні перегородок надавати перевагу конфігурації від меншої до більшої у напрямку поширення засобу.

Примітка:

1. Протокол №05/318/2026 стосується лише зразків, наданих Замовником та підданих випробуванням для отримання результатів при написанні Дисертаційної роботи.
2. Протокол є цілісним документом і може бути передрукований тільки в повному обсязі на підставі письмової згоди Науково-дослідної лабораторії пожежної безпеки ННІ ПтаТБ ЛДУБЖД.
3. Всього листів 23.

Науковий співробітник науково-дослідної
лабораторії пожежної безпеки
майор служби цивільного захисту

Павло ПАСТУХОВ

Аспірант кафедри фізики та хімії горіння

Олег ГІРСЬКИЙ

Начальник науково-дослідної лабораторії
пожежної безпеки
майор служби цивільного захисту



Іван АДЛЬФ



Додаток Г. Акти впровадження науково-дослідної роботи у практику

«Затверджую»



«02» квітня 2026 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
ВДОСКОНАЛЕННЯ НОРМАТИВНО-ТЕХНІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ВИПРОБУВАНЬ ВОГНЕГАСНИХ СИСТЕМ ТА ЗАСОБІВ В УКРАЇНІ
Олега ГІРСЬКОГО

Комісія в складі: голови комісії - Івана ЛЕВІВА та члена комісії - Мирослава БОРКОВСЬКОГО склали Акт про те, що результати роботи Олега ГІРСЬКОГО були використані при встановленні автономної аерозольної системи пожежогасіння для захисту складу ТОВ «НОЙ ІКС» із складною геометричною конфігурацією та наявністю значної кількості стелажів, які є не проникні для вогнегасної речовини об'ємної дії.

Голова комісії:  Іван ЛЕВІВ

Член комісії:  Мирослав БОРКОВСЬКИЙ

«Затверджую»

Директор ТОВ «АКВАТЕХНІК»

Код ЄДРПОУ 41137374

Катерина КВІТКО



«26» квітня 2026 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
ВДОСКОНАЛЕННЯ НОРМАТИВНО-ТЕХНІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ВИПРОБУВАНЬ ВОГНЕГАСНИХ СИСТЕМ ТА ЗАСОБІВ В УКРАЇНІ
Олега ГІРСЬКОГО

Комісія в складі: голови комісії – Олексія МЕРКУЛОВА та члена комісії – Євгена СМОЛЯНСЬКОГО склали Акт про те, що результати роботи Олега ГІРСЬКОГО були використані при встановленні автономної аерозольної системи пожежогасіння для захисту виробничого приміщення та складу ТОВ «АКВАТЕХНІК» із складною геометричною конфігурацією та наявністю значної кількості стелажів, які є не проникні для вогнегасної речовини об'ємної дії.

Голова комісії: Олексій МЕРКУЛОВ Олексій МЕРКУЛОВ

Член комісії: Євген СМОЛЯНСЬКИЙ Євген СМОЛЯНСЬКИЙ

«Затверджую»

Директор ТОВ «ПОЖЕЖНИЙ АРСЕНАЛ»

Код ЄДРПОУ 37387469

Дмитро ХОМЕНКО



квітня 2026

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
ВДОСКОНАЛЕННЯ НОРМАТИВНО-ТЕХНІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ВИПРОБУВАНЬ ВОГНЕГАСНИХ СИСТЕМ ТА ЗАСОБІВ В УКРАЇНІ
Олега ГІРСЬКОГО

Комісія в складі: голови комісії – Хоменка Дмитра Валерійовича, члена комісії – Молчанової Олени Вікторівни члена комісії – Мошковець Оксани Миколаївни склали даний Акт про те, що результати дисертаційної роботи Олега ГІРСЬКОГО, зокрема моделювання пожежогасіння за допомогою «CFD симулятора», використовується при проектуванні та розрахунку параметрів для встановлення та використання систем аерозольного чи газового об'ємного пожежогасіння з метою захисту приміщень із складною геометричною конфігурацією та наявністю значної кількості перегородок, які є не проникні для вогнегасної речовини об'ємної дії.

Голова комісії: Дмитро ХОМЕНКО

Член комісії: Олена МОЛЧАНОВА

Член комісії: Оксана МОШКОВЕЦЬ

Додаток Д. Скріншоти програми CFD -моделювання поширення агентів

