УДК 614.844; 614.845

ПОШИРЕННЯ ВОГНЕГАСНИХ АЕРОЗОЛІВ В ОБ'ЄМІ

Баланюк В.М., Гірський О.І.

SPREAD OF FIRE-EXTINGUISHING AEROSOLS IN VOLUME

Balanyuk V.M., Hirskyi O.I.

Анотація. *У статті досліджено особливості поширення аерозольних вогнегасних речовин у замкнених приміщеннях зі складною об'ємно-планувальною структурою. Розглянуто вплив геометрії приміщень, наявності перегородок, меблів, дверних прорізів і вентиляційних каналів на формування концентраційних полів діоксиду вуглецю та вогнегасних аерозолів. Проаналізовано відмінності механізмів переносу газо-твердофазних аерозольних систем, зокрема роль конвективного переносу, турбулентного перемішування та дифузійних процесів у формуванні зон ефективного та неефективного пожежогасіння. Показано, що для аерозольних агентів визначальним чинником є гравітаційне осадження частинок, яке зумовлює просторову нерівномірність концентрації та обмежує тривалість ефективної фази гасіння. Окрему увагу приділено аналізу витоків вогнегасних агентів через дверні прорізи й вентиляційні шахти та їх впливу на зниження ефективності систем об'ємного пожежогасіння. Встановлено, що ефективність об'ємного аерозольного пожежогасіння як правило визначається рівномірністю розподілу вогнегасної речовини в приміщенні, швидкістю досягнення розрахункової концентрації та здатністю аерозолю проникати у важкодоступні зони. При цьому на характер поширення аерозолю істотно впливають розмір і форма частинок, початкова швидкість викиду, розташування джерела подачі, а також наявність перешкод і внутрішніх перегородок. При розгляді механізму поширення вогнегасного аерозолю за меблями, було виявлено, що меблі та технологічне обладнання створюють так звану аеродинамічну тінь, у межах якої інтенсивність конвективного переносу зменшується і як наслідок вогнегасна концентрація знижується, що приводить до збільшення часу гасіння. Як наслідок, за масивними меблями можуть формуватися локальні зони з концентрацією аерозолю нижчою за вогнегасну, що призводить до зниження локальної ефективності пожежогасіння.*

Обґрунтовано доцільність застосування чисельного моделювання для прогнозування поведінки вогнегасних агентів у реальних умовах експлуатації, оптимізації розміщення джерел подачі та підвищення ефективності автоматичних

систем газового й аерозольного пожежогасіння в приміщеннях зі складною конфігурацією.

Ключові слова: *Об'ємне гасіння, вогнегасні аерозолі, діоксид вуглецю, замкнені приміщення.*

Вступ.

Реальні пожежі характеризуються складним плануванням та геометрією приміщень, наявністю певних перегородок, меблів, дверних прорізів, вентиляційних каналів та інших об'ємно-планувальних особливостей приміщень. Через це експерементальні дослідження занадто дорогі, трудомісткі та часто з обмеженими з точки зору відтворюваності.

У зв'язку з цим у сучасних наукових дослідженнях усе більшого поширення набувають чисельні методи моделювання процесів пожежогасіння, які дозволяють аналізувати поведінку вогнегасних аерозолів у замкнених об'ємах з урахуванням реальної геометрії приміщень та різноманітних сценаріїв розвитку пожежі.

Ефективність об'ємного аерозольного пожежогасіння як правило визначається рівномірністю розподілу вогнегасної речовини в приміщенні, швидкістю досягнення розрахункової концентрації та здатністю аерозолю проникати у важкодоступні зони. При цьому на характер поширення аерозолю істотно впливають розмір і форма частинок, початкова швидкість викиду, розташування джерела подачі, а також наявність перешкод і внутрішніх перегородок [1].

Таким чином, дослідження закономірностей поширення вогнегасних аерозолів в об'ємі приміщень є актуальною науково-практичною задачею, спрямованою на підвищення ефективності автоматичних систем об'ємного та локального пожежогасіння та обґрунтування їх проектних параметрів. Отримані результати можуть бути використані як для вдосконалення існуючих нормативних вимог, так і для оптимізації конструктивних та режимних характеристик систем пожежогасіння з урахуванням реальних умов експлуатаці [2,3].

Постановка задачі.

Поширення вогнегасного аерозолю у приміщенні різного призначення є непростим багатофакторним процесом, який визначається дією декількох фізико-хімічних механізмів, а саме молекулярною дифузією, конвецією, турбулентністю, гравітаційним осіданням та іншими процесами. Будь-який із цих чинників впливає на швидкість перенесення частинок, характер їх розподілу в об'ємі приміщення та тривалість збереження вогнегасної концентрації.

Сучасні системи пожежогасіння широко використовують вогнегасні аерозольні засоби завдяки їхній здатності швидко гасити дифузійне полум'я, створюючи газо-твердофазну суміш, яка інгібує хімічні реакції горіння та частково охолоджує осередок пожежі. Проте ефективність

засобів пожежогасіння залежить від розподілу вогнегасного аерозолю в об'ємі приміщення, а також від того, наскільки рівномірно досягається мінімальна ефективна концентрація у всіх зонах, включно з важкодоступними чи зонально обмеженими ділянками. Ці питання стають особливо актуальними в умовах складної геометрії приміщень, наявності перешкод та турбулентних потоків, що виникають під впливом систем вентиляції чи конструктивних елементів.

Викладення основного матеріалу.

Пожежі в замкнених об'ємах можуть ефективно гаситися аерозольними речовинами, які утворюють тонкодисперсну газо - твердофазну суміш і забезпечують інгібування реакцій горіння в об'ємі приміщення [4]. З огляду на різний фізичний стан і механізм дії зазначених агентів, процеси їх поширення в замкнених просторах мають певні особливості. Для аерозольних вогнегасних речовин визначальними є газодинамічні процеси формування концентраційних полів і витоку агенту через нещільності, а також суттєву роль відіграють дисперсність частинок і процеси їх осадження [5]. Серед аерозольних вогнегасних речовин особливе місце займають піротехнічні аерозольутворювальні сполуки, які при горінні утворюють вогнегасний аерозоль, який широко застосовується для гасіння пожеж у замкнених приміщеннях. Ефективність його використання залежить від герметичності об'єму, оскільки наявність отворів, дверей, вентиляційних шахт та інших каналів витоку істотно впливає на досягнення та утримання вогнегасної концентрації.

Моделювання пожежі при гасінні аерозолем у замкнених просторах ґрунтується на поєднанні газодинамічних, теплових та хімічних процесів, які змінюються у часі. В момент утворення аерозоль володіє високою температурою та спливає в верхню частину об'єму. При аерозольному пожежогасінні ключову роль відіграє дисперсний склад частинок, а також визначальним є часовий характер стабілізації концентрації аерозолю в момент його утворення коли він при охолодженні заповнює об'єм та забезпечує перерозподіл газових сумішей у приміщенні [6,7].

В початковий період: розвиток пожежі до запуску системи пожежогасіння моделюється вільний розвиток пожежі без впливу вогнегасного аерозолю. У цей період визначальними є: швидкість тепловиділення, утворення конвективних потоків, формування температурної стратифікації, споживання кисню в зоні горіння. У чисельних моделях, цей етап задає початкові умови: розміри температурних полів, концентрацію кисню, напрямки потоків. Саме ці параметри істотно впливають на подальшу ефективність гасіння аерозолю, оскільки високі температури створюють потужні конвективні висхідні потоки, які можуть перешкоджати рівномірному заповненню приміщення аерозолем. Після вивільнення

аерозолю іде утворення стійкої аерозольної структури яка формується в визначеному об'ємі та залишається стабільною до 20-35 хвилин. Протягом цього часу в об'ємі залишається вогнегасна концентрація, параметри котрої незначно змінюються в зазначеному проміжку часу.

В момент гасіння коли аерозоль надто швидко заповнює захищуваний об'єм відбувається створення надлишкового тиску. Саме у цей момент відбуваються: інтенсивне турбулентне перемішування; та можливе локальне різке зниження концентрації аерозолю, його часткове охолодження, Це ж саме явище може виникати при гасінні CO_2 через його розширення [8].

Моделювання показує [5-8], що ефективність гасіння на цій стадії визначається не лише кількістю аерозолю, а й швидкістю його подачі. Занадто повільна інжекція може призводити до витоку аерозолю через прорізи й вентиляційні канали, тоді як надто інтенсивна — до нерівномірного розподілу концентрації та зонального дефіциту вогнегасної речовини [9].

Після завершення активної подачі аерозолю система переходить у фазу утримання вогнегасної концентрації. У цей період ключовим є забезпечення умов, за яких об'ємна концентрація залишається стабільною у всьому об'ємі та не відбувається повторне займання. З позиції ефективності гасіння це найбільш чутливий етап, оскільки навіть незначні втрати аерозолю через дверні прорізи або вентиляційні шахти можуть призвести до локального відновлення горіння. Саме тут найбільш проявляється вплив герметичності приміщення та конфігураціїї сполучених об'ємів [10]. В завершальний період відбувається дегазація та процеси після пожежі. Останній часовий період пов'язаний із поступовим зниженням концентрації аерозолю внаслідок його осідання – седиментації та втрати його частини внаслідок природного або примусового повітрообміну. З погляду пожежної безпеки цей етап не впливає на сам факт гасіння, однак є критичним з точки зору безпеки персоналу, часу допустимого перебування людей та повторного доступу до приміщення.

Вогнегасний аерозоль у замкненому приміщенні являє собою газо-твердофазну систему, поширення якої визначається поєднанням конвективного переносу, турбулентної дифузії та осадження твердих частинок під дією гравітації. На відміну від газових агентів, концентраційне поле аерозолю є просторово неоднорідним, що призводить до формування зон зниженої ефективності пожежогасіння. Ключова відмінність від CO_2 це те, що аерозоль не поводиться як ідеальний газ, тому за перегородками та меблями можливі «тіньові зони» [11] Після активації аерозольної системи у приміщенні формується хмара з мікродисперсних частинок, які зважені у повітряному середовищі. Поширення аерозольних частинок у просторі визначається взаємодією

кількох фізичних процесів: турбулентного перемішування, дифузійного переносу, інерційних сил та гравітаційного осадження. Частинки розмірами від 1 до 10 мкм мають достатню рухливість для заповнення обсягу приміщення, але одночасно значною мірою піддаються осіданню з часом, що призводить до зниження концентрації вогнегасного агента у повітрі. Після розподілу у повітряному середовищі аерозольні частинки з часом осідають під дією гравітаційних сил, що призводить до зниження їхньої концентрації у повітрі. Це відрізняє аерозолі від газів, оскільки зменшення концентрації впливає на тривалість ефективної фази гасіння. Відмінною особливістю аерозолів є те, що їх поширення через дверні прорізи відбувається іншим чином, ніж для газових агентів. За рахунок більшої маси частинок та інерційних ефектів вони мають меншу здатність до витоку через відкриті двері порівняно з легкими газами. Частина частинок може осідати на кромках прорізів або у їх межах, що зменшує масовий потік речовини у суміжні приміщення [12].

З метою виявлення особливостей та параметрів поширення об'ємної вогнегасної речовини, зокрема аерозолю нами було проведено експеримент з виявлення особливостей та параметрів поширення вогнегасного аерозолю в об'ємі за перегородки з різною площею. Для цього було використано камеру розмірами 2*0,5*0,5. В камері було розташовано перегородки розміром 0,5м*0,2м, 0,5м*0,3м, та 0,5м*0,4м. Згідно цієї методики було проведено визначення зазначених параметрів в наступному порядку. Спочатку в камеру поміщали 1-й тигель з н-гептаном, який підпалювали, встановивши посеред камери відповідні перегородки, потім 2-й тигель, який теж підпалювали і після чого встановлювали заряд аерозолеутворювальної сполуки, яку після 30 секунд горіння тиглів теж підпалювали. Після того фіксували час гасіння тиглів. Дані заносили в табл. 1.

Таблиця 1.

Результати експерименту з визначення ефективності гасіння н-гептану за перегородками

	Місце встановлення та розмір перегородки	Час гасіння тиглів с.	Примітка
	Посередині, біля стінки. 0,2*0,5м	1тиг -14 2тиг- 12	Відбулось інтенсивне перемішування роз приділення аерозольної хмари в верхній частині. Рис.1 (поз.1.1.,-1.2)
	Посередині, біля стінки. 0,3*0,5м	1 тиг – 11 2 тиг - 15	Спостерігалось інтенсивне перемішування роз приділення роз приділення аерозолю навіть

			після гасіння.
	Посередині , біля стінки. 0,4*0,5м	1 тиг – 7 2 тиг - 17	Спостерігалось менш інтенсивне перемішування розприділення аерозолю.
	Послідовно розташовані від великої до малої перегородки	1 тиг – 18 2 тиг – 22 3 тиг – 25	Спостерігалось інтенсивне перемішування аерозолю через верхню частину приміщення навіть після гасіння.

Дані наведені в таблиці отримані з розкадровки відеозаписів експерименту, дані котрих частково показано на розкадровках Рис.1. На рисунку 1 показано розкадровки дослідження при гасінні тиглів з розташуванням перегородки посередині. Рис. 1 (поз 1.1., 1.2) та з розташуванням трьох перегородок з більшої до меншої в кінці камери Рис.1., позиція 2.1.-2.3.

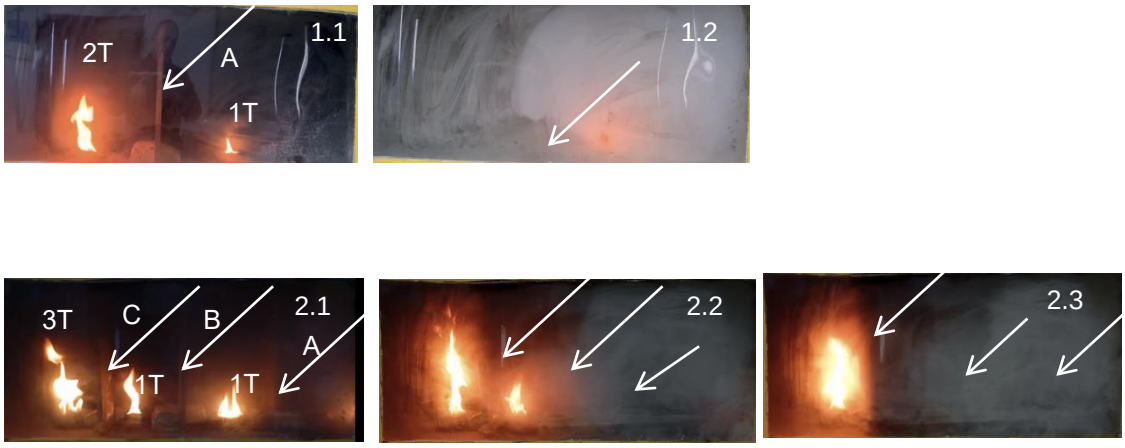

Рис. 1. Розкадровки дослідження гасіння тиглів при розташуванні перегородок всередині камери

На рисунку 1 показано позиції розташування перегородок. На позиції 1.1., стрілкою вказано місце розташування перегородки розмірами 0,2м., на 0,5 м. Виразами 1Т та 2Т позначено місця розташування тиглів в камері. На позиції 2.1-2.3 вказано місце розташування перегородок – А розміром 0,5 на 0,2м, В - розміром 0,5 на 0,3м., та С розміром 0,5 на 0,4м.

Таким чином, виходячи з результатів проведеного експерименту виявлено, із збільшенням розмірів площі перегородки час гасіння у всіх дослідах першого тигля був найменшим, а другого – більшим, при цьому ця величина залежала від площі самої перегородки. У всіх дослідах 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 аерозолю, а час гасіння при цьому зростав – Табл. 1. П 3 та П. 5. З них видно, що час гасіння при використанні перегородки з найбільшою площею зростав відповідно до 17 та 55 секунд. Загалом спостерігалась явище збільшення часу гасіння, коли остання перегородка мала найбільшу площу – максимальний час гасіння – 55 секунд. І коли перегородки розташовані в зворотньому порядку тобто спочатку перегородка максимальної площі потім по мірі зменшення площі, то відповідно час гасіння становив 25 секунд. Таким чином, можна зробити деякі заключення щодо поширення вогнегасного аерозолю, а саме, при послідовному розташуванні перегородок від більшої до меншої, час гасіння значно зріс для всіх тиглів до 55 секунд при трьох перегородках та 17 секунд при одній перегородці, що вказує на утруднене поширення аерозолю.

Щодо способу поширення потоків аерозолю то інтенсивне перемішування аерозольної хмари спостерігалось у випадках з меншою перегородкою до, та після гасіння при найбільшій перегородці. Відповідно із збільшенням площі перегородки, аерозоль ефективніше гасить перший тигель, але гірше гасить наступний, при цьому мала перегородка забезпечує більш рівномірний розподіл аерозолю між двома осередками. Велика перегородка створює ефект локалізації, в результаті концентрація аерозолю короткочасно підвищується значно вище за вогнегасну концентрацію відповідно перший тигель гаситься швидко, другий – пізніше, після досягнення вогнегасної концентрації.

Отже, досліджуючи розповсюдження вогнегасного аерозолю, було виявлено що наявність перегородок призводить до значного витоку аерозолю та винесення твердих частинок у суміжні приміщення. Проведений експеримент показав, що через отвори переважно підйом повітряних потоків у вентиляційних шахтах може також сприяти переносу аерозолю на інші рівні будівлі, створюючи потенційні небезпеки та порушуючи умови локального пожежогасіння. Нормативні документи EN 15004-8 та ДСТУ EN 15276-1:2021 (EN 15276-1:2019, IDT) [7], рекомендують враховувати вплив вентиляційних систем під час проєктування та випробувань аерозольних систем [13]. Також було визначено, що перегородки змінюють структуру потоку, викликаючи появу зон рециркуляції та застійних областей за перешкодами. У цих зонах концентрація аерозольних частинок може зменшуватися у 1,5–3 рази порівняно з відкритим простором, що негативно впливає на досягнення мінімальної ефективної концентрації гасіння [14]. Таким чином, розглядаючи поширення вогнегасного аерозолю за меблями, було виявлено, що меблі та технологічне обладнання створюють так звану аеродинамічну тінь, у межах якої інтенсивність конвективного переносу зменшується і як наслідок

вогнегасна концентрація знижується що приводить до збільшення часу гасіння. Як наслідок, за масивними меблями можуть формуватися локальні зони з концентрацією аерозолю нижчою за вогнегасну, що призводить до зниження локальної ефективності пожежогасіння [5].

Висновки.

У результаті проведеного аналізу, досліджено особливості поширення вогнегасних аерозолів у замкнених приміщеннях зі складною геометрією. Показано, що ефективність аерозольного пожежогасіння, істотно залежить від герметичності об'єму та здатності підтримувати необхідну вогнегасну концентрацію, при цьому сам процес поширення аерозолю характеризуються 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 аерозолю та тривалість його ефективної дії, що підтверджує необхідність застосування чисельного моделювання при проєктуванні систем об'ємного пожежогасіння в реальних умовах експлуатації.

Література:

1. Chow, W. K. Дослідження пожеж у закритих камерах. *Журнал пожежних наук*. 1995. Т. 13, № 2. С. 89–103. DOI: 10.1177/073490419501300201
2. ДСТУ EN 15276-1:2021. Стаціонарні системи пожежогасіння. Системи аерозольного пожежогасіння. Частина 1. Вимоги до компонентів і методи їх випробування (EN 15276-1:2019, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2021. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.htmlid_doc=95761
3. Zhou, J., Chan, N. K. Чисельне дослідження розподілу концентрації CO_2 в квартирі. *Внутрішнє та антропогенне середовище*. 2010. Т. 20, № 1. С. 91–100. DOI: 10.1177/1420326X10390670
4. McGrattan, K., Bilson, M. Моделювання поздовжньої вентиляції в тунелях за допомогою симулятора пожежної динаміки. *Журнал пожежної безпеки*. 2023. Т. 141. Стаття 103982. ISSN 0379-7112. DOI: https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103982
5. Su, Z., Li, Y., Luo, R., Zhong, H., Li, J., Geng, Z., Guo, Z. Механізм розливу шлейфів із кількох отворів на розподіл температури стелі під час пожеж у тунелях метро на основі принципу суперпозиції. *Тунелювання та підземна космічна технологія*. 2025. Т. 158. Стаття 106412. ISSN 0886-7798. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tust.2025.106412
6. Li, H., Zhang, G., Jia, B., Zhu, G., Guo, D., Zhang, P. Експериментальне дослідження вогнегасних характеристик рідкого азоту в підземному довгому та вузькому просторі. *Тунелювання та підземні космічні технології*. 2021.

Т. 114. Стаття 104009. ISSN 0886-7798. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104009
7. Лі, К., Лю, К., Лу, К., Тан, Л., Ву, Д., Хуан, Х. Вплив прямокутних перешкод на характеристики потоку ультрадисперсного сухого порошкового вогнегасного агента в замкнутих просторах. *Пожежна*. 2025. Т. 8, № 6. С. 236. DOI: https://doi.org/10.3390/fire8060236
8. Du, X., Wang, T., Zhao, J., Yu, Z., Zhang, H. Дослідження ефективності змішування ультратонких сухих порошкових вогнегасних агентів у різних зонах рециркуляції перешкод гондол літаків. *Безпека процесу та захист навколишнього середовища*. 2026. Т. 206. Стаття 108344. ISSN 0957-5820. DOI: https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.108344
9. Hu, X., Kraayeveld, A. Експериментальне та чисельне дослідження вогнегасної ефективності інертних газів у негерметичному корпусі. *Енергії*. 2022. Т. 15, № 12. Стаття 4323. DOI: https://doi.org/10.3390/en15124323
10. Баланюк, В. М., Козяр, Н. М., Гарасим'юк, О. І. Використання газоаерозольних порошкових вогнегасних сумішей для захисту запалювальних сумішей. *Science Rise*. 2016. DOI: 10.15587/2313-8416.2016.69333
11. Fan, W. P., Gao, Y., Zhang, Y. M., Chou, C. L., Chow, W. K. Експериментальні дослідження та моделювання швидкості полум'я при турбулентній дефлаграції у відкритій трубі. *Безпека процесу та захист навколишнього середовища*. 2019. Т. 129. С. 291–307. ISSN 0957-5820. DOI: https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.07.013
12. Zhang, X., Ismail, M. H., Ahmadun, F., Abdullah, N., He, K. Гарячі аерозольні вогнегасні речовини та пов'язані технології: огляд. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2015.
13. Hu, X., Kraayeveld, A. Експериментальне та чисельне дослідження вогнегасної ефективності інертних газів у негерметичному корпусі. *Енергії*. 2022. Т. 15, № 12. Стаття 4323. DOI: https://doi.org/10.3390/en15124323
14. Zhang, W.-B., Yin, Q., Liu, M.-R., Li, C.-Q., Wang, Z.-C., Hu, Z.-M. Дослідження ефективності випаровування та раптового охолодження гептафторпропану в збірних пристроях пожежогасіння на основі чисельного методу. *Пожежна*. 2025. Т. 8, № 4. Стаття 124. DOI: https://doi.org/10.3390/fire8040124

References

1. Chow, W. K. Doslidzhennia pozhezh u zakrytykh kamerakh. Zhurnal pozhezhnykh nauk. 1995. T. 13, № 2. S. 89–103. DOI: 10.1177/073490419501300201
2. DSTU EN 15276-1:2021. Statsionarni systemy pozhezhohasinnia. Systemy aerozolnoho pozhezhohasinnia. Chastyna 1. Vymohy do komponentiv i metody yikh vyprobuvannia (EN 15276-1:2019, IDT). Kyiv: DP «UkrNDNTs», 2021. URL:

https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.htmlid_doc=95761
3. Zhou, J., Chan, N. K. Chyselne doslidzhennia rozpodilu kontsentratsii SO_2 v kvartyri. Vnutrishnie ta antropohenne seredovyshche. 2010. T. 20, № 1. S. 91–100. DOI: 10.1177/1420326X10390670
4. McGrattan, K., Bilson, M. Modeliuvannia pozdovzhnoi ventyliatsii v tuneliakh za dopomohoiu symuliatora pozhezhnoi dynamiky. Zhurnal pozhezhnoi bezpeky. 2023. T. 141. Stattia 103982. ISSN 0379-7112. DOI: https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103982
5. Su, Z., Li, Y., Luo, R., Zhong, H., Li, J., Geng, Z., Guo, Z. Mekhanizm rozlyvu shleifiv iz kilkokh otvoriv na rozpodil temperatury steli pid chas pozhezh u tuneliakh metro na osnovi pryntsypu superpozytsii. Tuneliuvannia ta pidzemna kosmichna tekhnolohiia. 2025. T. 158. Stattia 106412. ISSN 0886-7798. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tust.2025.106412
6. Li, H., Zhang, G., Jia, B., Zhu, G., Guo, D., Zhang, P. Eksperymentalne doslidzhennia vohnehasnykh kharakterystyk ridkoho azotu v pidzemnomu dovhomu ta vuzkomu prostori. Tuneliuvannia ta pidzemni kosmichni tekhnolohii. 2021. T. 114. Stattia 104009. ISSN 0886-7798. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104009
7. Li, K., Liu, K., Lu, K., Tan, L., Vu, D., Khuan, X. Vplyv priamokutnykh pereshkod na kharakterystyky potoku ultradyspersnoho sukhoho poroshkovoho vohnehasnoho ahenta v zamknutykh prostorakh. Pozhezhna. 2025. T. 8, № 6. S. 236. DOI: https://doi.org/10.3390/fire8060236
8. Du, X., Wang, T., Zhao, J., Yu, Z., Zhang, H. Doslidzhennia efektyvnosti zmishuvannia ultratonkykh sukhykh poroshkovykh vohnehasnykh ahentiv u riznykh zonakh retsyrkuliatsii pereshkod hondol litakiv. Bezpeka protsesu ta zakhyst navkolyshnoho seredovyshcha. 2026. T. 206. Stattia 108344. ISSN 0957-5820. DOI: https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.108344
9. Hu, X., Kraayeveld, A. Eksperymentalne ta chyselne doslidzhennia vohnehasnoi efektyvnosti inertnykh haziv u nehermetychnomu korpusi. Enerhii. 2022. T. 15, № 12. Stattia 4323. DOI: https://doi.org/10.3390/en15124323
10. Balaniuk, V. M., Koziar, N. M., Harasymiuk, O. I. Vykorystannia hazoaerozolnykh poroshkovykh vohnehasnykh sumishei dlia zakhystu zapaliuvalnykh sumishei. ScienceRise. 2016. DOI: 10.15587/2313-8416.2016.69333
11. Fan, W. P., Gao, Y., Zhang, Y. M., Chou, C. L., Chow, W. K. Eksperymentalni doslidzhennia ta modeliuvannia shvydkosti polumia pry turbulentnii deflahratsii u vidkrytii trubi. Bezpeka protsesu ta zakhyst navkolyshnoho seredovyshcha. 2019. T. 129. S. 291–307. ISSN 0957-5820. DOI: https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.07.013
12. Zhang, X., Ismail, M. H., Ahmadun, F., Abdullah, N., He, K. Hariachi aerozolni vohnehasni rechovyny ta poviazani tekhnolohii: ohliad. Brazilian Journal of Chemical Engineering. 2015.
13. Hu, X., Kraayeveld, A. Eksperymentalne ta chyselne doslidzhennia vohnehasnoi efektyvnosti inertnykh haziv u nehermetychnomu korpusi. Enerhii. 2022. T. 15, № 12. Stattia 4323. DOI: https://doi.org/10.3390/en15124323
14. Zhang, W.-B., Yin, Q., Liu, M.-R., Li, C.-Q., Wang, Z.-C., Hu, Z.-M. Doslidzhennia efektyvnosti vyparovuvannia ta raptovoho okholodzhennia heptaftorpropanu v zbirnykh prystroiakh pozhezhohasinnia na osnovi chyselnoho metodu. Pozhezhna. 2025. T. 8, № 4. Stattia 124. DOI: https://doi.org/10.3390/fire8040124

Spread of Fire Extinguishing Aerosols in Volume

The article investigates the peculiarities of the spread of aerosol fire-extinguishing agents in enclosed spaces with complex volumetric and planning structures. The influence of room geometry, the presence of partitions, furniture, door openings, and ventilation channels on the formation of concentration fields of carbon dioxide and fire-extinguishing aerosols is considered. Differences in the mechanisms of transfer of gas–solid-phase aerosol systems are analyzed, in particular the role of convective transport, turbulent mixing, and diffusion processes in the formation of zones of effective and ineffective fire suppression. It is shown that for aerosol agents, the determining factor is gravitational particle deposition, which causes spatial non-uniformity of concentration and limits the duration of the effective extinguishing phase. Special attention is paid to the analysis of leakage of fire-extinguishing agents through door openings and ventilation shafts and their impact on reducing the efficiency of volumetric fire suppression systems. It is established that the effectiveness of volumetric aerosol fire suppression is generally determined by the uniformity of distribution of the extinguishing substance in the room, the speed of reaching the calculated concentration, and the ability of the aerosol to penetrate into hard-to-reach zones. At the same time, the spread of the aerosol is significantly influenced by particle size and shape, initial ejection velocity, source location, as well as the presence of obstacles and internal partitions. When considering the mechanism of aerosol spread behind furniture, it was found that furniture and technological equipment create so-called aerodynamic shadows, within which the intensity of convective transport decreases and, as a result, the extinguishing concentration is reduced, leading to an increase in extinguishing time. Consequently, behind massive furniture, local zones may form with aerosol concentrations lower than the extinguishing threshold, which reduces local fire suppression efficiency. The expediency of using numerical modeling to predict the behavior of fire-extinguishing agents under real operating conditions, optimize the placement of supply sources, and improve the efficiency of automatic gas and aerosol fire suppression systems in rooms with complex configurations is substantiated.

Keywords: *volumetric suppression, fire-extinguishing aerosols, carbon dioxide, enclosed spaces.*

Баланюк Володимир Мірчович – д.т.н., доц.., професор кафедри фізики та хімії горіння Львівського державного університету безпеки життєдіяльності.
Bagr9111@gmail.com

Гірський Олег Ігорович – аспірант. Львівський державний університет безпеки життєдіяльності

Стаття подана 24.02.2026.