



НАУКОВИЙ ВІСНИК: Цивільний захист та пожежна безпека

№ 21, 2026

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

ISSN 2518-1777

Редакційна колегія:

голова редколегії

д-р техн. наук

Пономаренко Р. В.

Заснований у 2016 році

Засновник

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту (ІДУ НД ЦЗ) (реорганізовано шляхом приєднання до НУЦЗ України)

Члени редакційної колегії:

д-р техн. наук

Жартівський С. В.

Національний університет цивільного захисту України (НУЦЗ України) - правонаступник

д-р техн. наук

Тютюнник В. В.

д-р техн. наук

Цапко Ю. В.

д-р техн. наук

Ніжник В. В.

д-р техн. наук

Яковчук Р. С.

д-р техн. наук

Лавренюк О. І.

д-р техн. наук

Нуянзін О. М.

д-р техн. наук

Мелещенко Р. Г.

д-р техн. наук

Балло Я. В.

Журнал зареєстровано Міністерством юстиції України

Свідоцтво від 20.07.2020

Серія КВ № 24507-14447 ПР

Ідентифікатор медіа R30-02071

канд. техн. наук

Пазен О. Ю.

канд. техн. наук

Халмурадов Б. Д.

PhD

Telak O.

PhD

Ficarella A.

Літературні

Коваль Н. О.

редактори:

(англ. мова)

Журнал включено до категорії «Б» Переліку наукових фахових видань України в галузі технічних наук за спеціальностями:

K8 Пожежна безпека

K10 Цивільна безпека

Наказ Міністерства освіти і науки України від 02.07.2020 № 886

У разі передруковування матеріалів письмовий дозвіл є обов'язковим

Рекомендовано до видання рішенням

Вченої ради НУЦЗ України

Протокол від 29.05.2026 № 11

Випусковий редактор

Борисова А. С.

Адреса редакції:

04074, м. Київ, вул. Вишгородська, 21

Телефони:

(+380) (44) 430-02-85

<https://nvcz.undicz.org.ua>

e-mail: niv1966@ukr.net

Ідентифікатор випуску DOI:

<https://doi.org/10.52363/2518-1777-2026-21>

Підписано до друку 29.05.2026

Формат 60 × 84/8

Наклад 50 прим.

ЗМІСТ

CONTENTS

С. Панченко, В. Ніжник, Д. Федоренко, М. Кропива

Тактичні підходи до гасіння пожеж у підземних резервуарах для зберігання нафтопродуктів 4

Н. Рашкевич, Р. Пурденко

Моделювання динамічної поведінки залізобетонних плит перекриття під імпульсним вибуховим навантаженням 17

М. Осадчук

Сучасний стан досліджень щодо способів та засобів генерації компресійної піни 28

В. Янішевський

Дослідження впливу розміщення залізобетонної колони у малогабаритній вогневій печі на рівномірність нагрівання її поверхні 38

П. Босак, М. Лаврівський, О. Любовецький, Г. Босак, В. Воробець

Удосконалення захисту об'єктів енергетичної інфраструктури України в умовах воєнного стану 46

М. Куценко, Г. Єлагін, О. Нуянзін, А. Алексєєв, Н. Гавриленко, Д. Кришталь

Фізико-хімічний механізм гасіння пожеж на поверхні водойм засобами на основі високопористої тирси деревини 58

В. Томенко, М. Томенко, Р. Мельник, О. Мельник

Параметричне обчислювальне дослідження післяаварійного стану залізобетонної каркасної будівлі після локального динамічного впливу 69

Д. Трегубов, А. Майборода, Є. Турбін, В. Нуянзін, Д. Журбинський

Процеси припинення самонагрівання пошкоджених літій-іонних акумуляторів подаванням води 78

S. Panchenko, V. Nizhnyk, D. Fedorenko, O. Zazymko, M. Kropyva

Tactical approaches to fire extinguishing in underground storage tanks for petroleum products

N. Rashkevich, R. Purdenko

Modeling the dynamic behavior of reinforced concrete floor slabs under impulsive blast loading

M. Osadchuk

Current state of research on methods and devices for compression foam generation

V. Yanishevskyi

Study of the influence of the position of a reinforced concrete column in a small-sized fire furnace on the uniformity of its surface heating

P. Bosak, M. Lavrivskyi, O. Liubovetskyi, H. Bosak, V. Vorobots

Improving the protection of Ukraine energy infrastructure facilities under martial law

M. Kutsenko, G. Yelagin, O. Nuianzin, A. Alyeksyeyev, N. Havrylenko, D. Kryshtal

Physicochemical mechanism of extinguishing fires on the surface of water bodies using agents based on highly porous wood sawdust

V. Tomenko, M. Tomenko, R. Melnyk, O. Melnyk

Parametric computational study of the post-accident state of a reinforced concrete frame building after local dynamic impact

D. Tregubov, A. Maiboroda, Ye. Turbin, V. Nuianzin, D. Zhurbynskyi

Stopping self-heating processes of damaged lithium-ion batteries by supplying water

- | | | |
|---|-----|---|
| <p>Ю. Фещук, Р. Кравченко, Д. Хроменков, К. Бєлікова
Обґрунтування технічних характеристик обладнання для випробування аерозолів на займистість у замкнутому просторі та проведення експериментальних досліджень</p> | 88 | <p>Y. Feshchuk, R. Kravchenko, D. Khromenkov, K. Bielikova
Substitution of technical characteristics of equipment for testing aerosols for flammability in a closed space and conducting experimental research</p> |
| <p>О. Хлевной, Н. Жезло-Хлевна, А. Борисова
Удосконалення класифікації груп мобільності населення на основі параметрично-орієнтованого підходу</p> | 96 | <p>O. Khlevnoi, N. Zhezlo-Khlevna, A. Borysova
Improving the classification of population mobility groups using a parameter-oriented approach</p> |
| <p>С. Шевченко, В. Луцик, О. Ковальов, Ю. Гапоненко, М. Змага
Розробка стохастичної моделі опису та оцінки ефективності управління ресурсами гарнізону ДСНС</p> | 106 | <p>S. Shevchenko, V. Lutsyk, O. Kovalev, Y. Gaponenko, M. Zmaha
Development of a model for describing and evaluating the effectiveness of decision-making and resource management in the state emergency service garrison</p> |
| <p>Р. Коваль, Н. Коваль, Д. Серєда, Л. Несенюк, С. Ємельяненко, І. Коваль
Оцінка ефективності та технічне регулювання пожежних кран-комплектів</p> | 122 | <p>R. Koval, N. Koval, D. Sereda, L. Nesenjuk, S. Yemelianenko, I. Koval
Efficiency evaluation and technical regulation for fire fighting hoses for fixed systems</p> |
| <p>В.-П. Пархоменко, Б. Михалічко, О. Лавренюк, Р. Пархоменко, П. Пастухов, Ю. Пархоменко О.
Вогнегасні випробування нової водної вогнегасної речовини</p> | 133 | <p>V.-P. Parkhomenko, B. Mykhalichko, H. Lavrenyuk, R. Parkhomenko, P. Pastukhov, Y. Parkhomenko
Fire suppression tests of a new water-based fire suppressant</p> |
| <p>О. Доценко, В. Присяжнюк, С. Семичаєвський, С. Огурцов, М. Якіменко, О. Тимошенко
Про створення випробувальної бази з перевірки окремих технічних вимог пожежної та спеціальної техніки</p> | 141 | <p>O. Dotsenko, V. Prisyazhnuk, S. Semychaievskyi, S. Ohurtsov, M. Yakimenko, O. Tymoshenko
On the establishment of a testing facility for verifying specific technical requirements for firefighting and special-purpose vehicles</p> |

УДК 614.84:662.767:628.9

ТАКТИЧНІ ПІДХОДИ ДО ГАСІННЯ ПОЖЕЖ У ПІДЗЕМНИХ РЕЗЕРВУАРАХ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ НАФТОПРОДУКТІВ

DOI: 10.52363/2518-1777-2026-21-1

Панченко С. О.^{1*}, ORCID iD 0000-0002-1781-3935

Ніжник В. В.², ORCID iD 0000-0003-3370-9027

Федоренко Д. С.¹, ORCID iD 0000-0002-2069-7760

Кропива М. О.¹, ORCID iD 0000-0002-1111-8747

*E-mail: panchenko_serhii@nuczu.edu.ua

¹Національний університет цивільного захисту України, Україна

²Інститут наукових досліджень з цивільного захисту НУЦЗ України, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції:

26.02.2026

Прийнято: 14.04.2026

Опубліковано:

30.05.2026

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

підземні резервуари,
нафтопродукти,
пожежогасіння, піна, водяна
мла, теплове
випромінювання,
комбіноване гасіння

АНОТАЦІЯ

У статті обґрунтовано тактичні підходи до гасіння пожеж у підземних резервуарах для зберігання нафтопродуктів та елементів підземної інфраструктури резервуарних парків в умовах обмеженого доступу, руйнування стаціонарних систем пожежогасіння і високої ймовірності утворення вибухонебезпечних пароповітряних сумішей. Актуальність дослідження зумовлена тим, що такі пожежі характеризуються складністю розвідки, ускладненим подаванням вогнегасних речовин, значним тепловим впливом на особовий склад і ризиком поширення горіння підземними комунікаціями, тоді як у чинній практиці відсутні достатньо структуровані тактичні рішення для подібних сценаріїв. У результаті дослідження сформовано алгоритми безпечного розгортання сил і засобів, визначено підходи до ізоляції джерела парів, локалізації розливів, застосування піни низької та середньої кратності в замкнених об'ємах, а також обґрунтовано доцільність комбінованого гасіння із поєднанням водяної мли та порошкових засобів для ліквідації локальних осередків на арматурі й у важкодоступних зонах. Встановлено, що під час аварійної фази пріоритет мають дистанційні дії, а вхід у підземні порожнини є недопустимим без виконання вимог контрольованого допуску до замкнених просторів. Для сценарію з тепловою потужністю 15 МВт моделювання показало зниження щільності теплового потоку на відстані 1,6 м з 8,2 до 2,6 кВт/м², тобто приблизно на 68 %, а зменшення цього показника нижче 4 кВт/м² відбувається орієнтовно через 20 с після активації зрошення. Практична цінність одержаних результатів полягає у можливості їх використання для планування оперативних дій, підготовки підрозділів ДСНС України та підвищення безпеки особового складу під час ліквідації пожеж у підземних резервуарах.

Постановка проблеми. Пожежі на об'єктах зберігання нафти та нафтопродуктів належать до категорії найбільш небезпечних техногенних явищ, оскільки поєднують високий ризик вибухів, інтенсивне теплове випромінювання, швидке поширення вогню по розлитих горючих рідинах та суттєвий вплив на навколишнє середовище. Особливо складними для ліквідації є пожежі у підземних резервуарах, які через свою конструктивну замкненість, накопичення вибухонебезпечних пароповітряних сумішей та обмежений доступ для

оперативних підрозділів створюють специфічні небезпеки для особового складу. Наявність замкнених просторів значно ускладнює організацію розвідки, подачу вогнегасних речовин, а також контроль за поширенням вогню по комунікаціях, що безпосередньо загрожує як ефективності гасіння, так і безпеці рятувальників.

На практиці ліквідація таких пожеж нерідко супроводжується руйнуванням конструкцій, викидом чи спінюванням нафтопродуктів, розповсюдженням парів через вентиляційні системи, що ускладнює

вибір тактики та потребує спеціальних заходів для локалізації наслідків. Додатковим чинником є сучасні реалії збройної агресії, за яких резервуарні парки стають об'єктами цілеспрямованих ударів, що призводить до масових горінь у підземній інфраструктурі та створює необхідність розробки спеціалізованих підходів для підвищення безпеки персоналу й ефективності застосування сил і засобів.

Міжнародний досвід містить рекомендації стосовно конструктивних рішень та протипожежного захисту, але потребує адаптації до українських умов. Водночас, наявні нормативно-правові акти в Україні регламентують загальні питання пожежогасіння на об'єктах нафтопродуктозабезпечення, однак відсутні чітко структуровані вимоги щодо гасіння пожеж у підземних резервуарах.

Таким чином, актуальність проблеми полягає у необхідності формування уніфікованої тактики гасіння пожеж у підземних резервуарах нафтопродуктів, що поєднує міжнародний досвід і національні практики та спрямована на підвищення ефективності реагування і захисту особового складу. В науковій статті розглянуто загальні вимоги до організації та ведення гасіння пожеж, пов'язаних із підземними резервуарами (underground storage tanks, далі - UST) для зберігання нафти та нафтопродуктів, включно з діями під час горіння у зонах горловин/оглядових камер, вентиляційних труб, біля дозаторів та при розливах у підземних комунікаціях. Вони базуються на настановах з безпечної експлуатації складів ЛЗР, що охоплюють як наземні, так і підземні резервуари та містять вимоги до проєктних і протипожежних рішень, а саме: водяне охолодження експозицій, застосування пінних систем, урахування специфіки проведення тактичної вентиляції, зонування, гасіння підземних трубопроводів [1].

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Наразі узагальнений вітчизняний досвід гасіння пожеж на складах нафтопродуктів, що сталися

внаслідок обстрілів розкрито в Методичних рекомендаціях щодо організації оперативних дій органів управління та підрозділів ДСНС під час гасіння пожеж на складах нафтопродуктів, що сталися внаслідок обстрілів в умовах ведення бойових дій. Рекомендації доведено до територіальних органів ДСНС окремим дорученням ДСНС від 23.05.2022 № В-269. Детальні вимоги до тактики гасіння підземних резервуарів, вибору та інтенсивності подачі вогнегасних речовин, а також заходів безпеки при роботі у замкнених просторах у діючих нормативно-правових актах відсутні. Аналіз міжнародного досвіду показує, що в роботі [1] досліджено механізми пригнічення випаровування палив під дією плівкоутворювальних піноутворювачів AFFF і безфтористих альтернатив F3. Показано їхню ефективність у запобіганні повторному займанню при гасінні пулових пожеж (англ. – pool fire) - форма горіння рідких вуглеводнів, що виникає внаслідок займання поверхні шару палива, розлитого або розташованого у відкритій ємності. Для даного типу пожеж характерні стала площа горіння, утворення полум'я над шаром рідини та формування радіаційного і конвективного теплообміну. Проте, дослідження проводилися лише для відкритих поверхонь, тоді як поведінка піни у замкнених об'ємах підземних резервуарів залишилася поза увагою. У роботі [2] досліджено ефективність різних вогнегасних засобів під час гасіння пожеж літій-іонних акумуляторів. Автори порівнюють дію окремих агентів за умов інтенсивного тепловиділення та повторного займання, що є важливим для розуміння обмежень універсального застосування вогнегасних речовин у складних пожежних сценаріях. Хоча дослідження не стосується безпосередньо пожеж у підземних резервуарах із нафтопродуктами, його результати підтверджують доцільність диференційованого підходу до вибору засобів гасіння залежно від механізму горіння, джерела тепловиділення та ризику повторного займання. У роботі [3]

досліджено токсикологічні ефекти фторсурфактантів, що використовуються у складі AFFF, та підкреслено необхідність пошуку екологічно безпечніших альтернатив. Це є важливим у контексті вибору піноутворювачів для гасіння пожеж на об'єктах зберігання нафтопродуктів. У публікації [4] здійснено огляд сучасних можливостей і викликів використання безфтористих піноутворювачів. Автори підкреслюють екологічні переваги, але вказують на необхідність збільшених витрат піни та обмежену ефективність при великих площах горіння. Невирішеним залишається питання оптимізації витрати піни для умов обмеженого доступу в підземних резервуарах. У роботі [5] досліджено властивості нано-модифікованої силіконової піни, призначеної для гасіння нафтових пожеж. Автори показують, що модифікація складу піни може підвищувати її стабільність, покривну здатність та вогнегасну ефективність, що є важливим для локалізації горіння рідких вуглеводнів. Хоча дослідження не орієнтоване безпосередньо на підземні резервуари, його результати підтверджують перспективність удосконалення пінних засобів для застосування в складних умовах обмеженого доступу та інтенсивного теплового впливу.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття. Нормативний документ NFPA 11 [6] регламентує витрати та методи подавання піни різної кратності для гасіння легкозаймистих рідин. Стандарт використовується як базовий міжнародний орієнтир, але він не враховує специфіки пошкоджених чи замкнених резервуарів, характерних для умов воєнних уражень. Вимоги [7] щодо безпеки робіт у замкнених просторах містять рекомендації з організації захисту персоналу. Однак відсутні конкретні тактичні схеми для гасіння пожеж у підземних резервуарах, що створює методичний вакуум для практики пожежних підрозділів. Європейський стандарт EN 12285-1 [8] визначає конструктивні особливості підземних

сталевих резервуарів. Документ спрямований на герметичність і надійність, але не містить алгоритмів гасіння пожеж у таких спорудах. Це свідчить про відокремленість інженерних рішень від тактики пожежогасіння. Британські рекомендації HSG176 [9] приділяють увагу застосуванню систем водяного охолодження та піни на складах ЛЗР. Водночас сценарії гасіння у підземних резервуарах розглянуті лише побіжно, що обмежує їх практичну цінність.

Методичні рекомендації ДСНС України (2022) визначають організацію оперативних дій підрозділів під час гасіння пожеж на складах нафтопродуктів, зокрема в умовах бойових дій, і були використані як основа для узагальнення практичних підходів до реагування на такі пожежі [10]. Проєкт рекомендацій ДСНС України (2024) систематизує підходи до гасіння пожеж у резервуарах і резервуарних парках на складах нафти та нафтопродуктів, тому його використано для уточнення тактичних рішень щодо подачі вогнегасних речовин і організації дій на таких об'єктах [11]. Статут дій встановлює загальний порядок організації, управління силами і засобами та виконання оперативних дій під час пожежогасіння, тому його положення використано як нормативну основу дослідження [12]. Наказ ДСНС України [13] визначає порядок удосконалення організації реагування на надзвичайні ситуації та небезпечні події, тому його положення використано для обґрунтування координації дій підрозділів під час ліквідації пожеж на об'єктах зберігання нафтопродуктів. Наказ ДСНС України [14] визначає особливості реагування на надзвичайні ситуації в умовах збройної агресії, тому його положення використано для врахування специфіки організації дій підрозділів під час гасіння пожеж на об'єктах зберігання нафтопродуктів у воєнний період. Правила безпеки праці в органах і підрозділах ДСНС [15] встановлюють вимоги щодо безпечного виконання робіт особовим складом, тому їх положення використано для обґрунтування заходів захисту рятувальників під час

гасіння пожеж на об'єктах зберігання нафтопродуктів. Окреме доручення ДСНС України [16] регламентує удосконалення організації реагування на надзвичайні ситуації та відображає практичні підходи до управління силами і засобами під час ліквідації пожеж на об'єктах зберігання нафтопродуктів. Окреме доручення ДСНС України [17] визначає порядок удосконалення реагування на надзвичайні ситуації та небезпечні події і відображає актуалізовані організаційні підходи до координації дій підрозділів під час ліквідації пожеж. Окреме доручення ДСНС України [18] встановлює заходи безпеки для органів і підрозділів служби та визначає організаційні вимоги до захисту особового складу під час виконання оперативних дій у небезпечних умовах.

Таким чином, наявні дослідження та нормативні акти підтверджують актуальність проблеми, проте залишають невирішеними питання тактики гасіння підземних резервуарів із нафтопродуктами. Відсутність уніфікованих підходів до подачі піни та охолодження в умовах обмеженого доступу й підвищеної небезпеки вибухів утворює науково-практичну проблему, вирішенню якої присвячено дану статтю.

Методи дослідження. У роботі застосовано методи аналізу та порівняння вимог вітчизняних і міжнародних нормативних документів, узагальнення оперативно-тактичного досвіду ліквідації пожеж на об'єктах зберігання нафтопродуктів і сценарний аналіз типових осередків горіння у підземній інфраструктурі. Для кількісної оцінки теплового впливу та ефективності охолодження експозицій виконано чисельне моделювання в середовищі Fire Dynamics Simulator (FDS, v.6.8.0, NIST). На основі отриманих даних сформовано та обґрунтовано тактичні рекомендації щодо розвідки, ізоляції, подачі піни та застосування водяної мли з урахуванням вимог безпеки робіт у замкнених просторах.

Формулювання цілей досліджень. Метою дослідження є

розроблення методичних підходів до підвищення ефективності та безпеки гасіння пожеж у підземних резервуарах для зберігання нафтопродуктів, які враховують їхні конструктивні особливості, специфіку розвитку пожеж та сучасні виклики, пов'язані з бойовими ураженнями і техногенними ризиками.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Визначити характерні небезпеки та специфічні фактори, що ускладнюють організацію гасіння пожеж у підземних резервуарах, включно з ризиками для особового складу та інфраструктури.

2. Обґрунтувати та розробити тактичні підходи до організації гасіння пожеж у підземних резервуарах із застосуванням пінних систем, водяного охолодження та комбінованих методів.

Виклад основного матеріалу дослідження. У дослідженні прийнято припущення, що аналіз типових сценаріїв розвитку пожеж та застосування стандартних вогнегасних речовин (піна середньої та низької кратності, вода у вигляді спрею, порошкові засоби) дає змогу розробити алгоритми оперативних дій для різних ситуацій. Як спрощення розглядалися моделі резервуарів стандартних об'ємів та поширені види нафтопродуктів.

Методологія дослідження ґрунтувалася на теоретичному аналізі процесів горіння і гасіння нафтопродуктів у підземних ємностях, вивченні нормативних документів та інструкцій ДСНС України, NFPA 11, OSHA 1910.146, EN 12285-1, HSG176, а також узагальненні досвіду ліквідації пожеж на нафтобазах.

Емпіричні дані отримано з офіційних методичних рекомендацій, практичних звітів і навчально-тренувальних матеріалів, де описано застосування пінних атак, водяного охолодження й комбінованих способів гасіння.

Перевірка адекватності запропонованих рішень здійснювалася шляхом порівняння теоретичних положень з реальною практикою гасіння,

відображеною у картках оперативно-тактичних дій та звітах ДСНС. Критеріями оцінки виступали ефективність припинення горіння, запобігання поширенню пожежі та рівень безпеки особового складу. Для кількісної оцінки ефективності системи водяного охолодження було виконано чисельне моделювання розподілу теплового потоку за допомогою FDS. Модель побудовано для сценарію горіння розлитих нафтопродуктів із тепловою потужністю $Q = 15$ МВт, з урахуванням умов для підземних резервуарів. Джерело випромінювання описувалось згідно з урахуванням фракції випромінювання $\chi=0.25$, температури полум'я 1100 °C і коефіцієнта атмосферного пропускання $\tau=0.95$. У моделі застосовано дві конфігурації охолодження:

1. Без зрошення – контрольний сценарій;

2. Зрошення системою водяної мли (англ. - spray/fog) з дисперсією 100–150 мкм, витратою $1,8$ л·с/м² і тиском 0,6 МПа.

Поняттям для вивчення став permit-required confined space (далі - PRCS), це «замкнений простір», який:

а) має обмежені шляхи доступу/виходу;

б) не призначений для постійного перебування, і при цьому має хоча б одну ознаку підвищеної небезпеки: потенційно/фактично небезпечну атмосферу (зокрема, >10 % LFL для горючих парів; $O_2 < 19,5$ % або $> 23,5$ %), ризик поглинання/засипання, конфігурацію, що «захоплює» чи блокує, або іншу визнану серйозну небезпеку.

До типових прикладів замкнених просторів OSHA прямо відносить підземні резервуари, колодязі, ями, сховища, а також

їх інфраструктуру. Це означає, що UST (англ. – underground storage tank) – PRCS за визначенням, якщо існує потенціал для небезпечної атмосфери (пари бензину/ДП, дефіцит кисню тощо) [3]. Пари ЛЗР формують вибухонебезпечні суміші, «сповзають» у низини, можуть поширюватися до джерела запалювання з відкатом полум'я; великі ємності мають підвищену небезпеку вибуху парів. Це визначає пріоритет дистанційної роботи, контролю оточення та захисту експозицій водяною млою/спреєм [5].

На рис. 1 схематично зображено змодельовану підземну інфраструктуру з найнебезпечнішими вузлами – оглядові камери/люки, точки наливу/зливу, вентиляційні труби (англ. - vent stack) та зона дозаторів; для них існують типові небезпечні зони (Зони 0/1/2) з радіусами, які слід враховувати при розгортанні сил і засобів та при виборі тактики (підхід з навітряної сторони, відстані, іскробезпечність) [6]. Дані радіуси будуть змінюватись в залежності від критеріїв теплового випромінювання на людину, яке вимірюється в кВт/м². У [19] застосовуються орієнтири 2-5-10 кВт/м², що є прийнятим у ризик-аналізах базисом встановлення безпечних відстаней для особового складу. Відстані в табл. 1 також будуть залежати від місткості резервуару, сценарію, тобто не являються фіксованими та вибираються за аналізом небезпек, відповідно до [9]. Орієнтиром для розташування техніки є [20] в якому використовуються контури від 12,5-37,5 кВт/м² для оцінки ураження конструкцій та техніки, де показник 12,5 кВт/м² є критичним для обладнання.

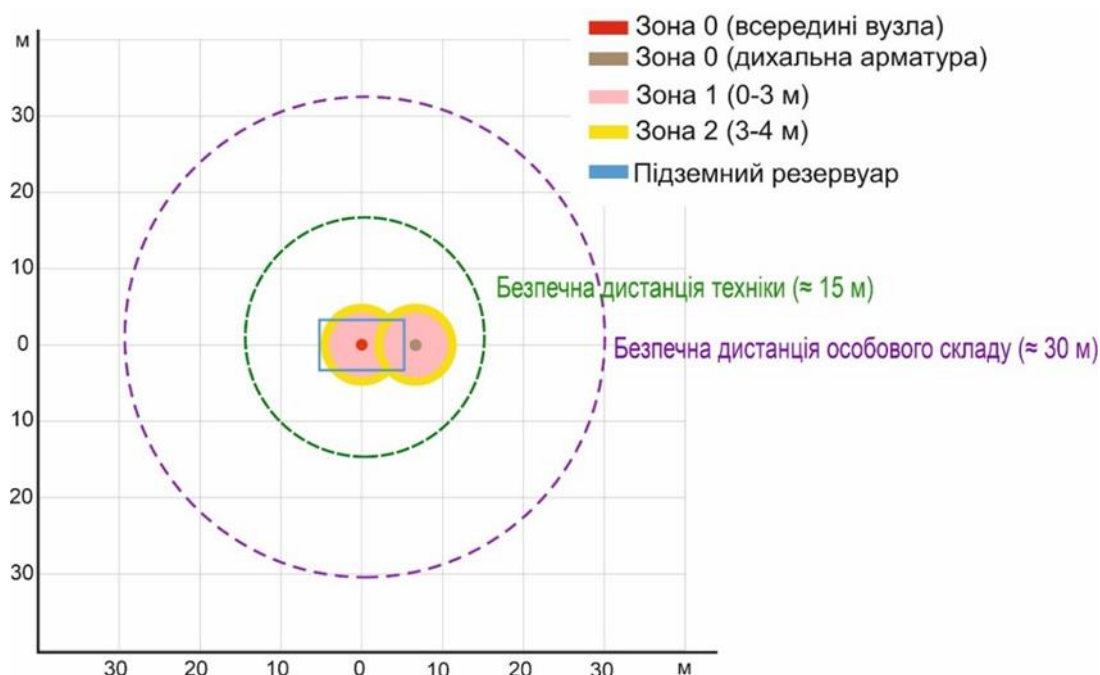


Рисунок 1 – Моделювання небезпечних зони та безпечні дистанції для особового складу та техніки до підземного резервуара і вузлів інфраструктури

Таблиця 1 – Пояснення зон і безпечних дистанцій для особового складу та техніки до підземного резервуара і вузлів інфраструктури.

Зона / Дистанція	Характеристика	Радіус (м)	Особливості дій
Зона 0	Вибухонебезпечна зона всередині люку/камери, у місці постійної наявності парів ЛЗР	≈ 0,5 м	Перебування людей заборонене; доступ лише при повній дегазації та за процедурою PRCS.
Зона 1	Зона, де пари можуть з'являтися під час нормальної експлуатації або аварії	до 3 м	Розгортання сил і засобів заборонено; допустима лише робота спеціальних іскробезпечних датчиків, приладів.
Зона 2	Зона, де пари з'являються лише у разі аварійних ситуацій	3–4 м	Можливе короткочасне перебування особового складу в ЗІЗОД; робота обладнання лише іскробезпечного виконання.
Безпечна дистанція техніки	Рекомендована відстань для розташування пожежних автомобілів, лафетних стволів, роботизованих комплексів	~15 м	Техніка встановлюється на цій відстані з урахуванням напрямку вітру та рельєфу.
Безпечна дистанція особового складу	Межа, ближче якої перебування допускається тільки в спеціальних ЗІЗОД та на короткий час	~30 м	Основний особовий склад розгортається за цією межею, дії у небезпечній зоні виконують лише підготовлені групи з допуском.

Отже, у технічних звітах [19] значення теплового випромінювання від 12,5-37,5 кВт/м² застосовуються як проєктні критерії, що дозволяє перерахувати потрібну відстань під вихідні дані, а саме виду палива, витрати парів, впливу вітру тощо. У нормах [20]

констатують, що для теплового випромінювання «немає єдиних стандартів», тому рекомендовані значення 2-5-10 кВт/м² призначені для розрахунків та проведення моделювання.

За результатами дослідження виділено ряд тактичних підходів до

організації гасіння пожеж у підземних резервуарах із застосуванням пінних систем, водяного охолодження та комбінованих методів. Первинною дією для всіх сценаріїв є негайна ізоляція, аварійне відключення насосів/дозаторів, знеструмлення, встановлення кордонів і відведення людей у підвітряну сторону; у випадку гасіння великих ємностей (з дзеркалом горіння понад 500 м²) – дотримання дистанцій/евакуаційних радіусів, робота з максимальної дистанції стаціонарними лафетами або наземними роботизованими комплексами типу Wolf R1, Colossus, TAF 35, LUF 60 тощо. Оперативне розгортання сил та засобів проводити зі сторони, протилежної поширенню парів; заходи з тактичної вентиляції проводиться лише навченим персоналом у ЗІЗОД; недопущення стоку в каналізацію/підземні порожнини (далі – сумпи) [5]. Сумп (sump – від англ. «поглиблення, «прямок», «збірник рідини» – це спеціально обладнана герметизована підземна камера, що розташовується під паливороздавальною колонкою або на стиках трубопроводів у складі резервуарного парку для зберігання нафтопродуктів і призначена для збирання витоків рідкого пального, контролю герметичності з'єднань та забезпечення

технічного доступу до арматури і комунікацій.

Наступним тактичним підходом є ліквідація розливів у камерах доступу, сумах, траншеях біля дозаторів. Основним засобом для цього є повітряно-механічна піна низької/середньої кратності (для полярних домішок – АR-піна або підтверджений фторвільний аналог), з укладанням пінної «ковдри»; заборонені прямі компактні струмені, щоб не розкидати пальне [5]. Пригнічення парів дозволено пінними покриттями.

Серед ключових видів ліквідації розливів став метод блокування стоку,

який полягає в локалізації розливів рідин або запобігання їх поширенню шляхом створення фізичних бар'єрів (дамб, насипів, кілець) навколо потенційного джерела розливу підвищуючи безпеку, запобігаючи забрудненню навколишнього середовища, сприяючи ефективному гасінню пожеж та охолодженню навколишніх конструкцій [5]. Усе обладнання повинно бути іскробезпечне/заземлене; робота стволів як позначено на рисунку 2 категорично обмежується розпиленням гасінням, компактні струмені використовувати забороняється.

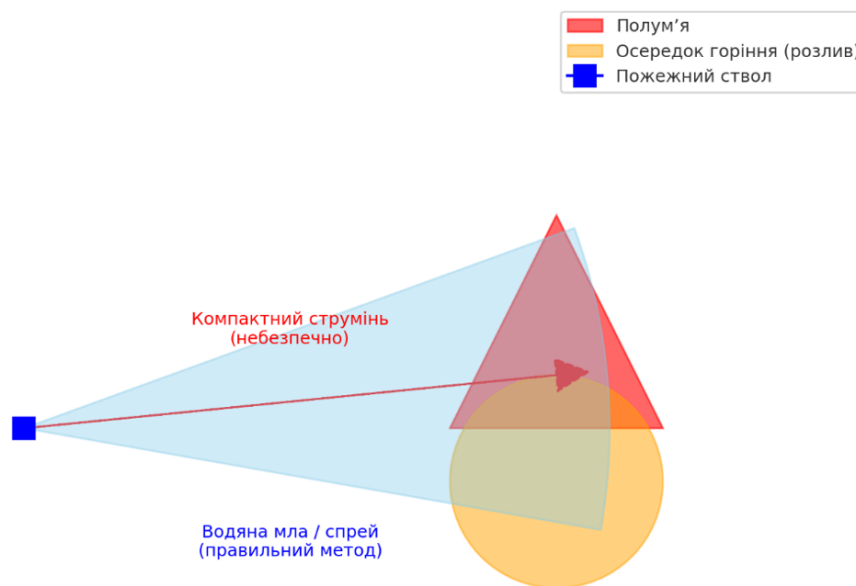


Рисунок 2 – Схематичне зображення методів роботи з різними типами вогнегасних струменів при розливі палива

Підходом до гасіння полум'я на газовідвідній трубі або при горінні випарів стала ліквідація джерела парів (зупинка подачі, герметизація шляхів надходження), охолоджуючи експозиції водяними розпиленими струменями. Газовідвідна труба підземного резервуара – це

вертикальний трубопровід, що з'єднує внутрішню порожнину підземного резервуара з атмосферою і призначений для вирівнювання тиску, видалення парів легкозаймистих рідин та запобігання руйнуванню резервуара при заправці чи спорожненні (рис. 3).

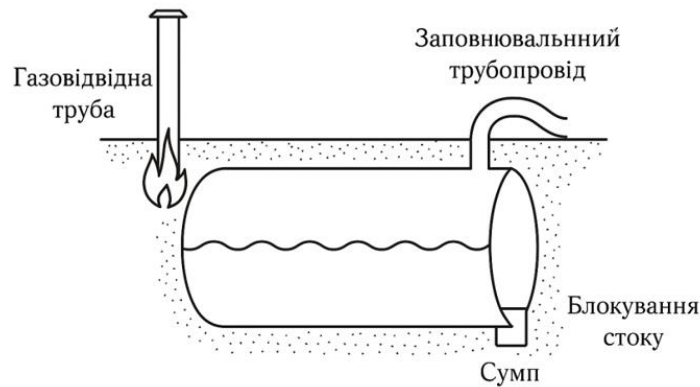


Рисунок 3 – Схематичне зображення підземного резервуара з UST-інфраструктурою

У [4, 5, 6] газовідвідна труба визначається як критичний елемент системи вентиляції підземних резервуарів, що одночасно виконує функції безпеки і є потенційним джерелом пожежної небезпеки. Поки джерело парів не усунуто, погашення факела може бути небезпечним (ризик повторного займання/зворотного удару полум'я). Для масивного горіння допускається тактика контрольованого вигорання з дистанції, коли пряме гасіння не забезпечує безпеки персоналу [5]. Оперативне розгортання враховує небезпечні зони довкола вентилів та горловин, заборонено дії, що спричиняють турбулентне втягування повітря у простір резервуара/вентиляційної труби [6].

Ключовим підходом до гасіння залишається охолодження експозицій і інфраструктури. Для резервуарних комунікацій, арматури, будівельних конструкцій водяні системи охолодження (spray/fog) можуть бути використані як

штатний елемент протипожежного захисту складів ЛЗР (рис. 4); їх застосування – базовий компонент тактики прикриття й локалізації поширення пожежі [9].

Spray/fog (від англ. spray – «розпил, струмінь дрібних крапель»; fog – «туман, імла») – це метод подачі води у вигляді дрібнодисперсного струменя, що формується спеціальними насадками чи стволами. Розмір крапель при подачі такого струменя становитиме 50-400 мкм, залежно від насадки при тиску в 5-10 бар, у системах високого тиску – до 100 бар. Кут розпилю при цьому становитиме від 90° до 120° для захисних «завіс». На відміну від компактного суцільного струменя, який подає воду у вигляді потужного потоку, spray/fog розпилює її на велику кількість дрібних краплин, збільшуючи площу контакту води з полум'ям і гарячими поверхнями. Таким чином створюється «завіса» від теплового випромінювання, що зменшує ризик для особового складу.

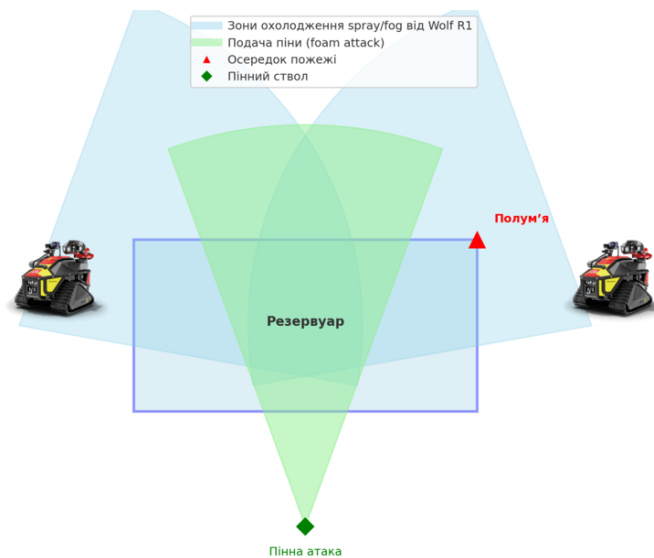


Рисунок 4 – Використання тактики spray/fog в поєднанні з наземними роботизованими комплексами при гасінні пожеж в підземних резервуарах

Водяний туман витісняє кисень із зони горіння та локалізує теплову дію на сусідні конструкції. На рис. 5 представлено дані порівняння інтенсивності теплового потоку до та після активації системи «spray/fog». Модель використана у дослідженні описує сценарій горіння

нафтопродуктів з тепловою потужністю $Q=15\text{МВт}$, фракцією випромінювання $\chi=0.25$, коефіцієнтом прозорості $\tau=0.95$. Система зрошення характеризується дисперсією 100–150 мкм, витратою $1.8\text{ л}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{м}^{-2}$ та тиском 0.6 МПа. Детальні результати наведено у таблиці 2.

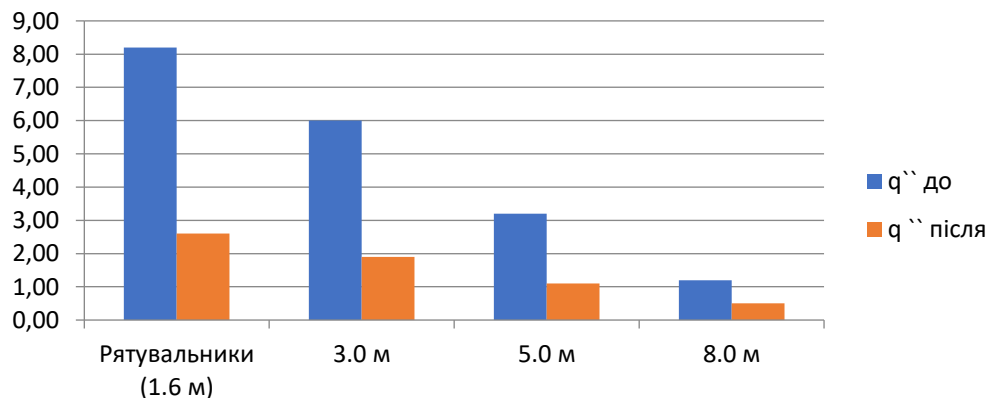


Рисунок 5 – Порівняння інтенсивності теплового потоку « q'' » до і після активації системи «spray/fog»

Таблиця 2 – Модельні результати зменшення теплового потоку при застосуванні системи «spray/fog».

Відстань, м	$q_{\text{до}}''$, кВт/м ²	$q_{\text{після}}''$, кВт/м ²	Зниження, %	$T_{\text{поверхні_до}}$, С ⁰	$T_{\text{поверхні_після}}$, С ⁰	$Q'' < 4$ кВт/м ² , с
1.6 м	8.2	2.6	68.3	310	145	20.0
3.0 м	6.0	1.9	68.3	260	120	10.0
5.0 м	3.2	1.1	65.6	200	90	0.5
8.0 м	1.2	0.5	58.3	120	60	0.0

Під час проведення робіт у замкнених просторах внутрішні порожнини резервуара, сумпи/камери під дозаторами та підземні колодязі у режимі НС розглядаються як PRCS. Вхід під час гасіння заборонено, доки не виконані всі вимоги програми допуску (оцінка атмосфери, вентиляція, нагляд, рятувальні заходи). За відсутності повного дотримання заходів безпеки необхідно працювати виключно дистанційно [3].

Дані підходи до тактики гасіння враховують організаційні вимоги до планування і взаємодії. Об'єкт має передбачати водяне охолодження та/або пінні системи для сценаріїв розливів і локальних загорянь у підземній інфраструктурі. Плани реагування враховують небезпечні зони довкола газовідвідних труб, горловин/оглядових камер і дозаторів; оперативне розгортання підрозділів здійснюється з урахуванням цих меж і напрямку вітру/рельєфу. Будь-які роботи всередині сумпів/камер/резервуарів проводяться лише за процедурою PRCS після завершення аварійної фази і з повним пакетом заходів безпеки згідно з OSHA 1910.146 [7].

Суттєвою особливістю при вирішенні задачі з гасіння підземних резервуарів є визначення безпечних зон і дистанцій. Згідно з проведеним моделюванням, зона миттєвої вибухонебезпеки – «Зона 0», формується безпосередньо в межах горловин та оглядових камер, зона регулярного викиду парів – «Зона 1» сягає до трьох метрів, а потенційна зона вторинного поширення – «Зона 2» розташована в радіусі до чотирьох метрів. Це пояснює необхідність розташування пожежної техніки на відстані не менше 15 метрів, а основних сил особового складу не ближче ніж 30 метрів від осередку пожежі. Такий підхід дозволяє зменшити ризик ураження у випадку раптового вибуху чи відкату полум'я.

Порівняно з відомими методиками, отримані результати мають низку переваг. По-перше, вони інтегрують міжнародні стандарти (NFPA, HSE, EN) у національні, що забезпечує їх практичну адаптацію. По-друге, рішення враховують реалії воєнного

стану, що зумовлює необхідність організації резервних систем водопостачання та облаштування укриттів для особового складу. По-третє, розроблена методика передбачає комбіноване застосування піни та порошкових засобів для гасіння локальних осередків у «карманах» і на арматурі, що дозволяє досягати більшої надійності у складних сценаріях.

Подальший розвиток дослідження може передбачати деталізацію алгоритмів дій залежно від виду нафтопродукту, сезонних умов і ступеня руйнування конструкцій. Перспективним напрямом є впровадження дистанційно керованих роботизованих комплексів для роботи в межах небезпечних зон, а також експериментальні випробування ефективності безфтористих піноутворювачів у замкнутому просторі. Це сприятиме формуванню єдиних стандартів тактики гасіння пожеж у підземних резервуарах та підвищенню рівня захисту особового складу.

Висновки та напрями подальших досліджень. Дослідження підтверджує, що підземні резервуари для зберігання нафти та нафтопродуктів (UST) створюють комплекс специфічних небезпек, зумовлених замкненістю простору, накопиченням парів ЛЗР, а також ускладненою доступністю для аварійно-рятувальних підрозділів. Аналіз міжнародних нормативів (NFPA, OSHA, HSE, EN 12285-1) та вітчизняних рекомендацій ДСНС показав, що в Україні бракує чітко регламентованих процедур для гасіння пожеж у підземних резервуарах, зокрема щодо класифікації небезпечних зон, дистанційної подачі вогнегасних речовин та вимог до робіт у замкнених просторах.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішено такі завдання:

1. Визначено характерні небезпеки, властиві підземним резервуарам, серед яких накопичення вибухонебезпечних парів у замкнених об'ємах, утворення зон миттєвої небезпеки (Зона 0), зони регулярного викиду парів

(Зона 1) і потенційної зони поширення (Зона 2). Особливістю результатів є значення, які узгоджуються з міжнародними критеріями теплового впливу, для особового складу прийнято межі у 5 кВт/м^2 (рівень, при якому можливі опіки II ступеня за 60 с), для техніки – $12,5 \text{ кВт/м}^2$ (рівень, при якому можливі серйозні пошкодження матеріалів та обладнання). Запропоновані в дослідженні дистанції були розраховані для типового випадку горіння у газовідвідній трубі і становлять практичний інструмент для планування розташування сил і засобів під час гасіння пожеж у підземних резервуарах.

2. Обґрунтування та розроблення тактичних підходів до гасіння пожеж у підземних резервуарах із застосуванням пінних систем, водяного охолодження та комбінованих методів показали, що оптимальна тактика має бути багаторівневою, стандартизованою та відповідати екологічним нормам. Аналіз методів подачі вогнегасних речовин підтвердив ефективність пін середньої та низької кратності для ліквідації розливів та загорянь у замкнених просторах. Заборона використання компактних струменів пояснюється ризиком розбризкування пального, тоді як укладання пінної «ковдри» дозволяє стабілізувати осередок горіння та пригнічувати випаровування. Важливим технічним результатом стало уточнення режимів охолодження:

використання систем spray/fog у вигляді водяної мли виявилось оптимальним для зниження температури арматури та комунікацій, запобіганню поширенню вогню на суміжні вузли та конструкції. Результати показали, що середня інтенсивність теплового потоку на рівні розташування рятувальників (1,6 м від поверхні) зменшилась з $q_{до}''=8.2 \text{ кВт}$ до $q_{після}''=2.6 \text{ кВт}$, що відповідає зниженню теплового навантаження на 68%. При цьому температура зовнішніх поверхонь арматури та металевих конструкцій зменшилась з 310°C до 145°C протягом 90 с після активації системи. Аналіз динаміки температури в зоні дії водяного туману засвідчив, що вже через 20 с після початку зрошення тепловий потік зменшує інтенсивність нижче порогу дискомфорту $4 \text{ кВт}\cdot\text{м}^{-2}$, що дозволяє забезпечити роботу особового складу без додаткового екранування. Додатково було зафіксовано зменшення видимості полум'я у візуальному діапазоні на 30–40 %, що вказує на ефективне розсіювання випромінювання краплями води.

Таким чином, результати дослідження мають практичне значення для формування нових нормативних документів в Україні та їх узгодження із міжнародними вимогами, що є критично важливим у контексті інтеграції у світову систему техногенної безпеки.

Конфлікт інтересів: Ніжник В.В. є членом редакційної колегії журналу «Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека», але не брав жодної участі в процесі рецензування цієї статті, обговоренні чи прийнятті рішення щодо її публікації. Процедура розгляду рукопису повністю забезпечувалася незалежними членами редколегії та зовнішніми рецензентами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Wu, J., Chen, P., Fang, L. *et al.* Experimental Study on Combustion Characteristics of Transformer Oil Pool Fire and Effects of Foam-Water Spray Parameters on Fire Extinguishing Efficiency. *Fire Technol* 62, 29 (2026). <https://doi.org/10.1007/s10694-025-01862-3>.
2. Mrozik, W., McDonald, J., Shuttleworth, E. *et al.* Performance of Extinguishing Agents against Lithium-Ion Battery Fires. *Fire Technol* 62, 3 (2026). <https://doi.org/10.1007/s10694-025-01831-w>.
3. Hagenars, A., Meyer, I. J., Herzke, D., Pardo, B. G., Martinez, P., Pabon, M., ... & Knapen, D. (2011). The search for alternative aqueous film forming foams (AFFF) with a low environmental impact: Physiological and transcriptomic effects of two Forafac® fluorosurfactants in turbot. *Aquatic toxicology*, 104(3-4), 168-176. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2011.04.012>.
4. Li, Z., Zhu, H., Zhao, J., Zhang, Y., & Hu, L. (2024). Experimental Research on the Effectiveness of Different Types of Foam of Extinguishing Methanol / Diesel Pool Fires. *Combustion Science and Technology*, 196(12), 1791–1809. <https://doi.org/10.1080/00102202.2022.2125306>.

5. Huang, Z., Ding, H., Quan, S., Fu, M., Wang, G., Zeng, M., ... Li, G. (2026). Preparation and Properties of Nano-Modified Silicone Foam for Extinguishing Oil Fires. *Combustion Science and Technology*, 198(3), 755–777. <https://doi.org/10.1080/00102202.2025.24647676>.
6. National Fire Protection Association. NFPA 11: Standard for Low-, Medium-, and High-Expansion Foam. Quincy, MA: NFPA, 2024.
7. Occupational Safety and Health Administration. Permit-Required Confined Spaces. OSHA 1910.146. Washington, DC: OSHA, 2020. URL: <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.146>.
8. European Committee for Standardization. EN 12285-1:2003. Workshop fabricated steel tanks. Part 1: Horizontal cylindrical single and double skin tanks for underground storage of flammable and non-flammable water polluting liquids. Brussels: CEN, 2003.
9. Health and Safety Executive. HSG176: The storage of flammable liquids in tanks. 2nd ed. London: HSE, 2019. URL: <https://www.hse.gov.uk/pubns/books/hsg176.htm>.
10. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. Методичні рекомендації щодо організації оперативних дій підрозділів ДСНС під час гасіння пожеж на складах нафтопродуктів, що сталися внаслідок обстрілів в умовах ведення бойових дій. Київ: ДСНС України, 2022. 42 с. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0801-18#n8>.
11. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. Рекомендації щодо гасіння пожеж у резервуарах і резервуарних парках на складах нафти та нафтопродуктів: Проект (19.06.2024). Київ: ДСНС України, 2024. 85 с.
12. Міністерство внутрішніх справ України. Статут дій органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту під час гасіння пожеж: наказ МВС від 26.04.2018 № 340 (зарєєстровано в Мін'юсті 10.07.2018 за № 801/32254). Київ: МВС України, 2018. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0801-18#Text>
13. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. Про удосконалення порядку організації реагування на надзвичайні ситуації та небезпечні події: наказ ДСНС від 05.08.2022 № 441. Київ: ДСНС України, 2022. URL: <https://lv.dsns.gov.ua/upload/2/1/9/5/7/4/1/ns-441.pdf>
14. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. Про особливості реагування на надзвичайні ситуації під час збройної агресії: наказ ДСНС від 02.04.2024 № 375. Київ: ДСНС України, 2024. URL: <https://dsns.gov.ua/upload/2/0/8/0/8/1/6/rekom.pdf>
15. Правила безпеки праці в органах і підрозділах ДСНС: наказ ДСНС від 31.12.2025 №1661. Київ: ДСНС України, 2025. URL: <https://kyiv.dsns.gov.ua/upload/2/5/3/4/9/1/2/pravila-bezpeki-praci-v-organax-ta-pidrozdilax-dsns.pdf>
16. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. Про удосконалення організації реагування на надзвичайні ситуації: окреме доручення від 15.07.2022 № В-425. Київ: ДСНС України, 2022. URL: <https://lv.dsns.gov.ua/upload/2/1/9/5/6/6/2/v-425.pdf>
17. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. Про удосконалення порядку організації реагування на надзвичайні ситуації та небезпечні події: окреме доручення від 14.06.2023 № В-466. Київ: ДСНС України, 2023. URL: <https://lv.dsns.gov.ua/upload/2/1/9/5/6/8/0/v-466.pdf>
18. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. Про заходи безпеки: окреме доручення від 24.07.2023 № В-589. Київ: ДСНС України, 2023. URL: <https://lv.dsns.gov.ua/upload/2/1/9/5/6/8/1/v-589.pdf>
19. National Oceanic and Atmospheric Administration. Thermal Radiation Levels of Concern [Електронний ресурс]. Office of Response and Restoration, 2023. URL: <https://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/chemical-spills/resources/thermal-radiation-levels-concern.html>
20. National Fire Protection Association. NFPA 30: Flammable and Combustible Liquids Code. Second Draft Report (A2023) [Електронний ресурс]. Quincy, MA: NFPA, 2023. URL: https://docinfofiles.nfpa.org/files/AboutTheCodes/30/30_A2023_FLC_TAN_SD_SRReport.pdf

REFERENCES

1. Wu, J., Chen, P., Fang, L., et al. (2026). Experimental study on combustion characteristics of transformer oil pool fire and effects of foam-water spray parameters on fire extinguishing efficiency. *Fire Technology*, 62, 29. <https://doi.org/10.1007/s10694-025-01862-3>.
2. Mroziak, W., McDonald, J., Shuttleworth, E., et al. (2026). Performance of extinguishing agents against lithium-ion battery fires. *Fire Technology*, 62, 3. <https://doi.org/10.1007/s10694-025-01831-w>.
3. Hagenaaers, A., Meyer, I. J., Herzke, D., Pardo, B. G., Martinez, P., Pabon, M., ... & Knapen, D. (2011). The search for alternative aqueous film forming foams (AFFF) with a low environmental impact: Physiological and transcriptomic effects of two Forafac® fluorosurfactants in turbot. *Aquatic Toxicology*, 104(3–4), 168–176. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2011.04.012>.
4. Li, Z., Zhu, H., Zhao, J., Zhang, Y., & Hu, L. (2024). Experimental research on the effectiveness of different types of foam for extinguishing methanol/diesel pool fires. *Combustion Science and Technology*, 196(12), 1791–1809. <https://doi.org/10.1080/00102202.2022.2125306>.
5. Huang, Z., Ding, H., Quan, S., Fu, M., Wang, G., Zeng, M., ... & Li, G. (2026). Preparation and properties of nano-modified silicone foam for extinguishing oil fires. *Combustion Science and Technology*, 198(3), 755–777. <https://doi.org/10.1080/00102202.2025.24647676>.
6. National Fire Protection Association. (2024). *NFPA 11: Standard for low-, medium-, and high-expansion foam*. NFPA.
7. Occupational Safety and Health Administration. (2020). *Permit-required confined spaces (OSHA 1910.146)*. U.S. Department of Labor. <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.146>.
8. European Committee for Standardization. (2003). *EN 12285-1: Workshop fabricated steel tanks - Part 1: Horizontal cylindrical single and double skin tanks for underground storage of flammable and non-flammable water polluting liquids*. CEN.
9. Health and Safety Executive. (2019). *HSG176: The storage of flammable liquids in tanks* (2nd ed.). HSE. <https://www.hse.gov.uk/pubns/books/hsg176.htm>.

10. State Emergency Service of Ukraine. (2022). *Guidelines for the organization of operational actions of SES units during firefighting at oil depots that occurred as a result of shelling in combat conditions*. SES of Ukraine. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0801-18#n8>.
11. State Emergency Service of Ukraine. (2024). *Recommendations for extinguishing fires in tanks and tank farms at oil and petroleum product depots: Draft (June 19, 2024)*. SES of Ukraine.
12. Ministry of Internal Affairs of Ukraine. (2018). *Charter of actions of management bodies and units of the Operational Rescue Service of Civil Protection during firefighting: Order of the Ministry of Internal Affairs of April 26, 2018 No. 340 (registered with the Ministry of Justice on July 10, 2018 No. 801/32254)*. MIA of Ukraine. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0801-18#Text>.
13. State Emergency Service of Ukraine. (2022). *On improving the organization of response to emergencies and hazardous events: SES Order of August 5, 2022 No. 441*. SES of Ukraine. <https://lv.dsns.gov.ua/upload/2/1/9/5/7/4/1/ns-441.pdf>.
14. State Emergency Service of Ukraine. (2024). *On the peculiarities of responding to emergencies during armed aggression: SES Order of April 2, 2024 No. 375*. SES of Ukraine. <https://dsns.gov.ua/upload/2/0/8/0/8/1/6/rekom.pdf>.
15. State Emergency Service of Ukraine. (2025). *Safety rules in the bodies and units of the State Emergency Service of Ukraine: SES Order of December 31, 2025 No. 1661*. SES of Ukraine. <https://kyiv.dsns.gov.ua/upload/2/5/3/4/9/1/2/pravila-bezpeki-praci-v-organax-ta-pidrozdilax-dsns.pdf>.
16. State Emergency Service of Ukraine. (2022). *On improving the organization of response to emergencies: Special directive of July 15, 2022 No. V-425*. SES of Ukraine. <https://lv.dsns.gov.ua/upload/2/1/9/5/6/6/2/v-425.pdf>.
17. State Emergency Service of Ukraine. (2023). *On improving the organization of response to emergencies and hazardous events: Special directive of June 14, 2023 No. V-466*. SES of Ukraine. <https://lv.dsns.gov.ua/upload/2/1/9/5/6/8/0/v-466.pdf>.
18. State Emergency Service of Ukraine. (2023). *On safety measures: Special directive of July 24, 2023 No. V-589*. SES of Ukraine. <https://lv.dsns.gov.ua/upload/2/1/9/5/6/8/1/v-589.pdf>.
19. National Oceanic and Atmospheric Administration. (2023). *Thermal radiation levels of concern*. Office of Response and Restoration. <https://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/chemical-spills/resources/thermal-radiation-levels-concern.html>.
20. National Fire Protection Association. (2023). *NFPA 30: Flammable and combustible liquids code. Second draft report (A2023)*. NFPA. https://docinfofiles.nfpa.org/files/AboutTheCodes/30/30_A2023_FLC_TAN_SD_SRreport.pdf.

TACTICAL APPROACHES TO FIRE EXTINGUISHING IN UNDERGROUND STORAGE TANKS FOR PETROLEUM PRODUCTS

Panchenko S.¹, Nizhnyk V.², Fedorenko D.¹, Kropyva M¹

¹National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine

²Institute of Scientific Research on Civil Protection of the National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine

KEYWORDS	ABSTRACT
oil, fire, extinguishing, thermal impact, foam attack, spill, cooling.	The article substantiates tactical approaches to extinguishing fires in underground storage tanks for petroleum products and in elements of the underground infrastructure of tank farms under conditions of limited access, destruction of fixed firefighting systems, and a high probability of the formation of explosive vapor-air mixtures. The relevance of the study is determined by the fact that such fires are characterized by difficult reconnaissance, complicated application of extinguishing agents, significant thermal impact on personnel, and the risk of fire spread through underground utilities, while current practice lacks sufficiently structured tactical solutions for such scenarios. As a result of the study, algorithms for the safe deployment of personnel and equipment were developed; approaches to vapor source isolation, spill containment, and the application of low- and medium-expansion foam in confined spaces were identified; and the feasibility of combined extinguishing using water mist and dry powder agents for eliminating local fires on fittings and in hard-to-reach areas was substantiated. It was established that during the emergency phase, priority should be given to remote operations, and entry into underground voids is unacceptable without compliance with the requirements for controlled entry into confined spaces. For a scenario with a heat release rate of 15 MW, the modeling showed a decrease in heat flux density at a distance of 1.6 m from 8.2 to 2.6 kW/m², that is, by approximately 68%, while this indicator decreased to below 4 kW/m² approximately 20 s after the activation of spray cooling. The practical value of the results obtained lies in the possibility of using them for planning operational actions, training units of the State Emergency Service of Ukraine, and improving personnel safety during the extinguishment of fires in underground storage tanks.

УДК 614.841

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЛИТ ПЕРЕКРИТТЯ ПІД ІМПУЛЬСНИМ ВИБУХОВИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

DOI: 10.52363/2518-1777-2026-21-2

Пурденко Р. Р., ORCID iD 0000-0001-6467-4133

Рашкевич Н. В*, ORCID iD 0000-0001-5124-6068

*E-mail: rashkevych_nina@nuczu.edu.ua

Національний університет цивільного захисту України, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції:

12.03.2026

Прийнято: 20.04.2026

Опубліковано:

30.05.2026

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

залізобетонна плита
перекриття, вибухове
навантаження, імпульсна дія,
напружено-деформований
стан, скінченно-елементне
моделювання, LIRA-FEM.

АНОТАЦІЯ

У роботі досліджено динамічну поведінку залізобетонної плити перекриття під дією імпульсного вибухового навантаження. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення надійності та безпеки будівельних конструкцій за умов дії екстремальних навантажень, що можуть виникати внаслідок техногенних аварій або бойових уражень. У таких умовах застосування чисельних методів дозволяє відтворювати напружено-деформований стан конструкцій та прогнозувати їхню поведінку без проведення великої кількості дорогих експериментальних випробувань. Для дослідження використано результати повномасштабних експериментальних випробувань залізобетонних плит, навантажених вибухом заряду тринітролуолу. На основі експериментальних даних відтворено геометричні параметри плити, схему армування, характеристики бетону та сталевих арматур, а також граничні умови обпирання. Чисельне моделювання виконано у програмному комплексі LIRA-FEM у постановці нестационарної динамічної задачі з урахуванням фізичної та геометричної нелінійності матеріалів. Для бетону застосовано нелінійну діаграму деформування, для арматури – пружно-пластичну модель з урахуванням границі текучості. Початковий напружено-деформований стан конструкції сформовано шляхом попереднього статичного розрахунку. Для визначення динамічних характеристик плити проведено модальний розрахунок, за результатами якого встановлено власні частоти та відповідні форми коливальності, а також визначено параметри демпфування. Вибухове навантаження у чисельній моделі задано у вигляді рівномірно розподіленого імпульсного тиску по площі плити, що дозволяє врахувати інтегральний силовий ефект вибухової хвилі. Отримані результати чисельного моделювання порівняно з експериментальними даними. Встановлено, що максимальний прогин плити, визначений у розрахунку, становить 36,7 мм, тоді як експериментальне значення дорівнює 41 мм. Відносне відхилення не перевищує 10,49 %, що свідчить про прийнятний рівень збіжності результатів. Розроблена модель адекватно відтворює характер напружено-деформованого стану та коливальної реакції залізобетонної плити під дією імпульсного вибухового навантаження. Отримані результати можуть бути використані для подальших досліджень впливу параметрів вибуху та конструктивних характеристик на працездатність залізобетонних елементів.

Постановка проблеми. Будівлі та споруди, що можуть зазнавати вибухових впливів, повинні забезпечувати не лише збереження несучої здатності, а й безпеку людей. Під дією вибухової хвилі конструкції сприймають короточасне, але інтенсивне навантаження, яке може спричинити деформації, утворення тріщин та пошкодження.

Залізобетонні плити перекриття є важливими елементами будівель, оскільки забезпечують їх просторову жорсткість і сприймають значну частину навантажень. Їх пошкодження при вибуху може призвести до зниження загальної стійкості будівлі та створити загрозу для людей.

Проведення експериментів із вибуховими навантаженнями є складним та затратним, тому для дослідження роботи конструкцій широко застосовують чисельне моделювання. Однак, не вирішеною частиною проблеми є забезпечення достатньої достовірності таких моделей для прогнозування напружено-деформованого стану плит перекриття при імпульсному вибуховому навантаженні.

Таким чином, у роботі вирішується задача перевірки можливості використання комп'ютерної скінченно-елементної моделі для достовірного прогнозування поведінки залізобетонної плити перекриття при вибуховому впливі з метою підвищення безпеки людей та надійності будівель.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для дослідження поведінки будівельних конструкцій за вибухових та комбінованих аварійних впливів дослідники широко використовують чисельне моделювання. Такий підхід дає змогу простежити динамічну реакцію елементів, оцінити їх напружено-деформований стан, залишкові деформації та можливі форми руйнування. У роботі [1] розглянуто пошкодження сталевих колон при вибуховому навантаженні; отримані результати підтвердили придатність скінченно-елементного аналізу для прогнозування як локальних, так і загальних деформацій. Дослідження [2] присвячене поведінці сталеві пластини при дії вибуху з використанням LS-DYNA, де показано можливість чисельного відтворення її прогинів і загального

характеру динамічної відповіді. У праці [3] досліджено особливості моделювання вибухового навантаження середнього радіуса дії, зокрема обґрунтовано вибір розрахункової схеми, яка забезпечує достатню точність без надмірного збільшення обчислювальних витрат. У [4] подано результати аналізу перфорованих сталевих елементів при вибуховій дії, що дозволило оцінити не лише їх деформування, а й залишкову несучу здатність після навантаження.

Праця [5] стосується чисельного аналізу сталеві будівлі при вибуху та відображає загальну реакцію каркасної системи залежно від параметрів вибухового впливу. У роботі [6] запропоновано змішаний елементний підхід для аналізу сталевих рам за послідовної дії вибуху та пожежі. У [7] досліджено поведінку широкополічних сталевих колон при одночасній дії осевого стиску і бокового вибухового навантаження, що дозволило простежити вплив цих чинників на характер деформування. Публікація [8] стосується живучості сталевих каркасів після локального вибухового пошкодження та подальшого пожежного впливу. У праці [9] поєднано чисельний і аналітичний підходи до вивчення поведінки та форм руйнування сталевих колон при вибухових навантаженнях. Робота [10] присвячена легким сталевим колонам за комбінованої дії високої температури та вибуху, тобто розглядає спільний вплив теплових і динамічних чинників. У [11] проаналізовано локальну реакцію W-подібних сталевих колон під дією вибухової хвилі, що дало змогу деталізувати особливості їх місцевого деформування.

Окремий напрям становлять дослідження, присвячені залізобетонним конструкціям. Зокрема, у [12] побудовано скінченно-елементну модель для оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних елементів. У роботі [13] запропоновано математичну й комп'ютерну модель визначення вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних перекриттів із розрахунково-експериментальною перевіркою.

У дослідженні [14] розглянуто моделювання стійкості та надійності системи «грунт–фундамент–будівля» при силових і високотемпературних впливах, тобто акцент зроблено на сумісній роботі всієї конструктивної системи.

Найбільш близькою до тематики даної роботи є праця [15], у якій поєднано експериментальне та чисельне дослідження армованих плит з ультрависокоміцного бетону при вибухових навантаженнях, що підтверджує доцільність використання скінченно-елементного моделювання для аналізу плитних конструкцій при дії вибуху.

Разом із тим за результатами розгляду наведених джерел встановлено, що більшість праць присвячена сталевим елементам, каркасам, комбінованим вибухо-пожежним впливам або вогнестійкості залізобетонних конструкцій. Натомість питання чисельного прогнозування динамічної реакції залізобетонної плити перекриття при імпульсному вибуховому навантаженні досліджено недостатньо. Це зумовлює необхідність розроблення та перевірки достовірності комп'ютерної скінченно-елементної моделі, придатної для прогнозування напружено-деформованого стану залізобетонної плити перекриття за вибухового впливу.

Формулювання цілей дослідження. Мета дослідження полягає у розробленні та перевірці достовірності комп'ютерної скінченно-елементної моделі для прогнозування напружено-деформованого стану залізобетонної плити перекриття при дії імпульсного вибухового навантаження.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати результати повномасштабних експериментальних досліджень динамічної реакції залізобетонної плити перекриття при дії

вибухового навантаження та визначити вихідні параметри для чисельного моделювання;

- розробити скінченно-елементну модель залізобетонної плити в програмному комплексі LIRA-FEM з урахуванням фізичної та геометричної нелінійності, фактичної схеми армування, характеристик матеріалів і граничних умов обпирання;

- виконати чисельне моделювання динамічної реакції плити при імпульсному вибуховому навантаженні та оцінити достовірність розробленої моделі шляхом порівняння результатів розрахунку з експериментальними даними.

Методи дослідження. Для проведення дослідження використано скінченно-елементне моделювання у програмному комплексі LIRA-FEM, що дозволяє враховувати фізичну та геометричну нелінійність бетону та арматури. Початковий напружено-деформований стан формувався за допомогою попереднього статичного розрахунку. Динамічні характеристики плити визначалися методом модального розрахунку з оцінкою власних частот та демпфування за моделлю Релея. Вибухове навантаження у моделі задавалося як рівномірно розподілений по площі плити тиск, а результати чисельного моделювання зіставлялися з даними повномасштабних експериментів для перевірки достовірності.

Виклад основного матеріалу дослідження. Основою для перевірки достовірності розробленої моделі становлять результати повномасштабних експериментальних досліджень [15]. Згідно з описом експерименту, випробувальні плити мали розміри 2000×1000×75 мм та однакову схему розташування сталевих арматури. На рис. 1 наведено геометричні параметри зразків і схему їх армування.

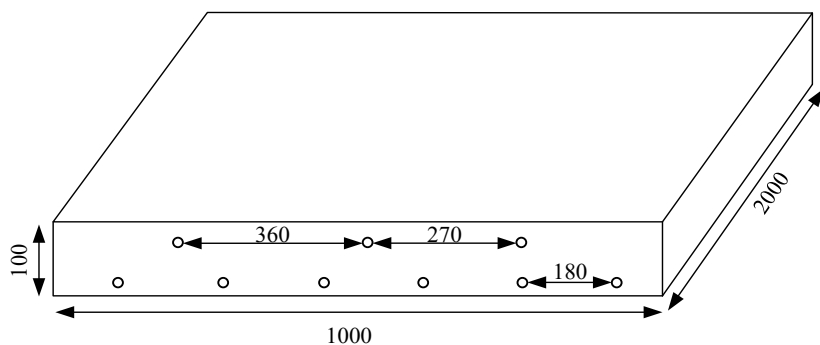


Рисунок 1 – Геометричні розміри зразків, розміщення арматури

Залізобетонні плити були виготовлені з високоміцного бетону та армовані підвищеної міцності сталеву арматурою.

Механічні властивості бетону й сталеву арматури, що використовувалися під час серії вибухових випробувань, наведено в таблицях 1 та 2 відповідно.

Таблиця 1 – Механічні властивості бетону

Модуль Юнга, МПа	Коефіцієнт Пуассона	Гранична міцність, МПа	Кінцеве напруження	Густина, кг/м ³
51,503	0,20	128,9	0,0025	2424,9

Таблиця 2 – Механічні властивості сталі

Коефіцієнт армування, %	Тип сталі, мм	Міцність сталі, МПа
1,4	Високоміцна, 15,2	1750

Випробувальні зразки плит розміщували на спеціальному випробувальному стенді та фіксували у заданому положенні, забезпечуючи відтворюваність граничних умов під час випробувань.

Заряд тринітротолуолу масою 8 кг підвішували на мотузці, закріпленій на трубчастій рамі, конструкція якої забезпечувала надійне підвішування та можливість плавного регулювання висоти розташування заряду над плитою, а також його стабільне позиціювання відносно центра зразка (рис. 2).



Рисунок 2 – Загальний вигляд випробувальної установки [15]

Основні параметри вибухового навантаження, прийняті під час проведення експериментальних досліджень (рис. 3), а також відповідні зафіксовані характеристики імпульсу, тривалості позитивної фази, відбитого та падаючого тиску, наведено в таблиці 3.

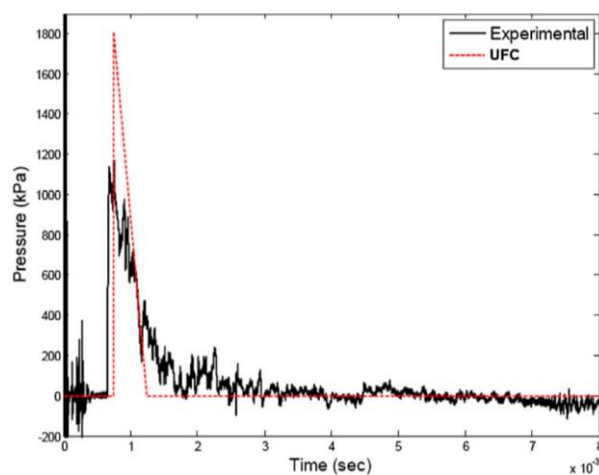


Рисунок 3 – Графік надлишкового тиску вибуху в часі [15]

Таблиця 3 – Параметри вибухового навантаження

Вага заряду в тротиловому еквіваленті, кг	Масштабована відстань, м/кг ^{1/3}	Тривалість позитивної фази, мс	Відбитий тиск вибуху, кПа	Падаючий тиск вибуху, кПа
8	0,5	4,2	1185	307

Для реєстрації відбитого тиску на дослідних зразках встановлювалися датчики тиску. Вимірювання переміщень випробувальних зразків здійснювали лінійними датчиками переміщень, схему розташування яких наведено на рис. 4.

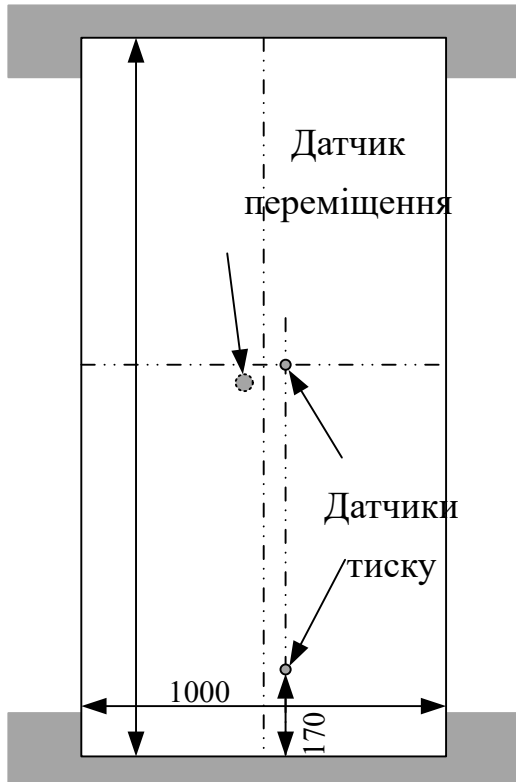


Рисунок 4 – Система збору даних (датчики тиску та переміщення) [15]

За результатами випробувань руйнування залізобетонної плити не зафіксовано. Максимальне вертикальне переміщення плити вниз становило 41 мм, після чого відбулося її часткове

відновлення до початкового положення (рис. 5).



Рисунок 5 – Вигляд залізобетонної плити після випробування [15]

Розробка комп'ютерної моделі залізобетонної плити перекриття виконана в програмному комплексі LIRA-FEM у постановці нестационарної динамічної

задачі з урахуванням фізичної та геометричної нелінійності (рис. 6).

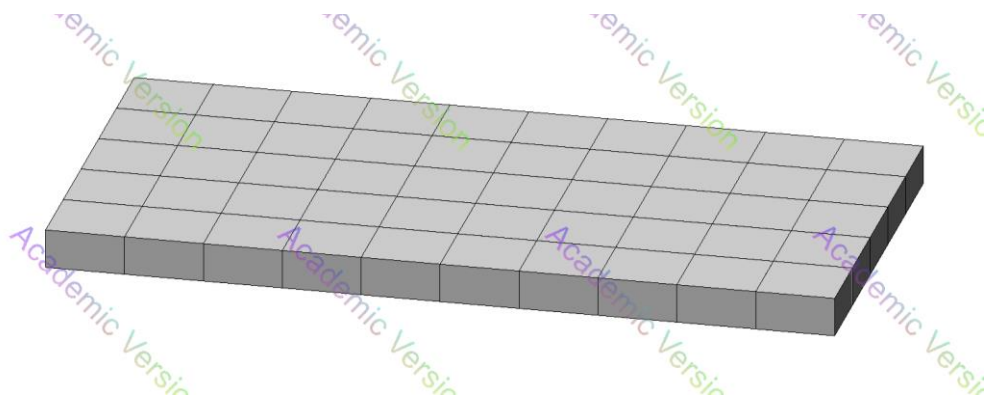


Рисунок 6 – Скінченно-елементна модель залізобетонної плити

У моделі відтворено фактичні геометричні параметри плити, схему армування, товщину захисного шару та граничні умови обпирання відповідно до експериментальної схеми (рис. 1, 5).

Характеристики бетону та арматури задано згідно з прийнятими в експерименті характеристик матеріалів (табл. 1, 2). Для бетону враховано нелінійну діаграму деформування, для арматури пружно-пластичну діаграму з урахуванням границі текучості.

Перед прикладанням імпульсного вибухового навантаження виконано попередній статичний розрахунок для формування початкового напружено-деформованого стану від постійних навантажень. Отриманий напружено-деформований стан прийнято як початковий стан для подальшого динамічного аналізу.

Для визначення динамічних характеристик плити виконано модальний аналіз, за результатами якого встановлено власні частоти та відповідні форми коливаль. На основі отриманих частот

визначено параметри демпфування за моделлю Релея.

З урахуванням того, що відстань від епіцентру вибуху до конструкції становила 8 м, вибухове навантаження в чисельній моделі задано у спрощеній постановці у вигляді рівномірно розподіленого по площі плити тиску (еквівалентного навантаження). Такий підхід обґрунтовано припущенням про відносно малу нерівномірність просторового розподілу надлишкового тиску в межах габаритів плити на зазначеній відстані, що дає змогу знехтувати локальними градієнтами тиску та врахувати дію вибухової хвилі через інтегральний силовий ефект.

Прийняте спрощення забезпечує відтворення загальної реакції елемента (прогинів та напружено-деформованого стану) за умови збереження сумарної імпульсної дії.

На рис. 7 наведено прикладення навантаження на поверхню плити.

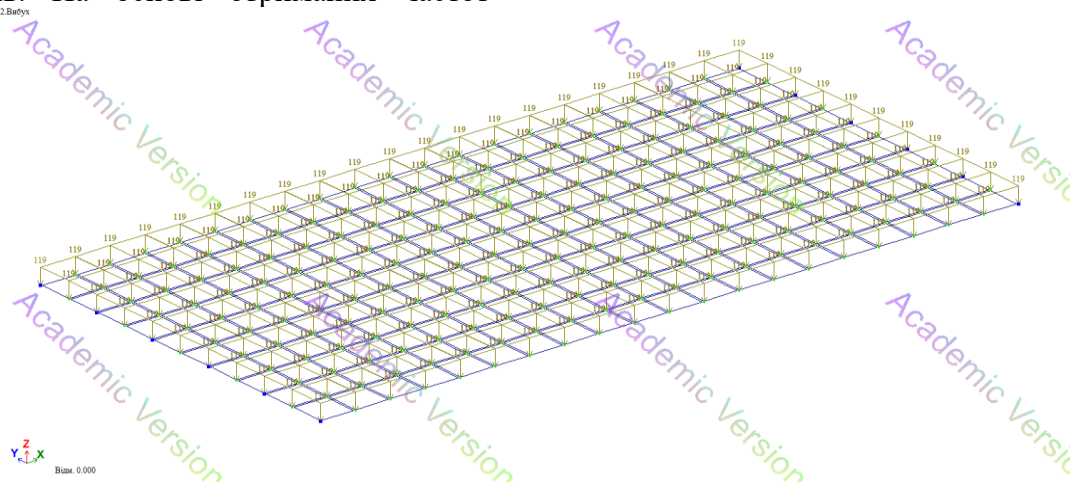


Рисунок 7 – Прикладення навантаження на поверхню плити

Вибухове навантаження задано у вигляді часової залежності тиску, що відповідає параметрам вибухової хвилі, зафіксованим під час експерименту. Розрахунок виконано методом прямого

інтегрування рівнянь руху з кроком часу, що забезпечує коректне відтворення короточасного імпульсного впливу (рис. 8).

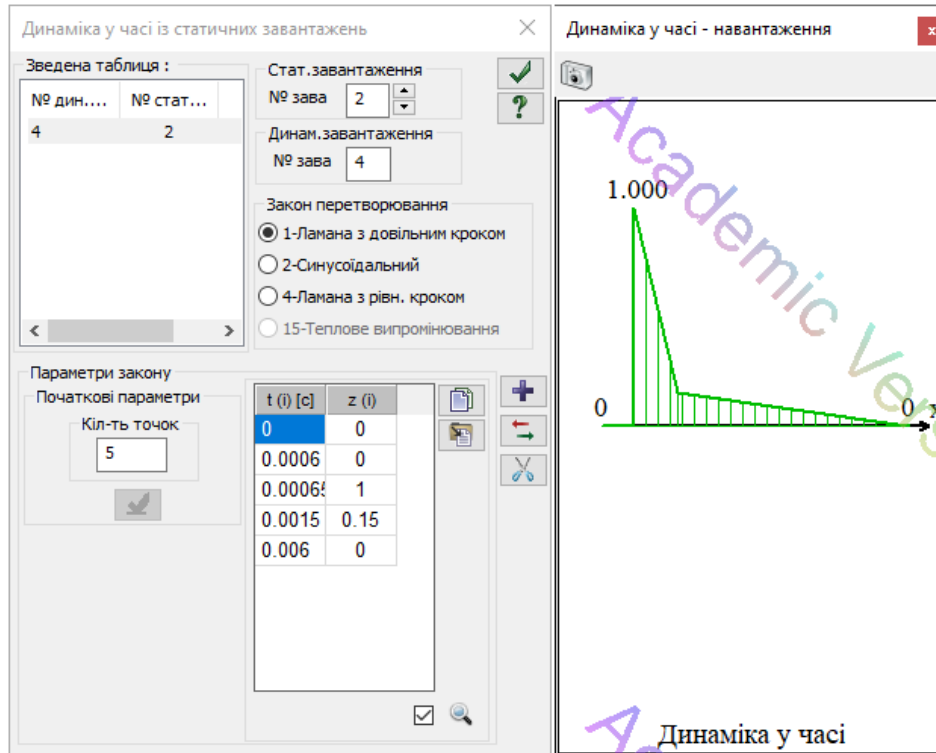


Рисунок 8 – Перетворення навантаження від вибуху в динаміку

За результатами розрахунку напружено-деформованого стану визначено максимальний прогин плити у напрямку дії вибухового навантаження, який становив 36,7 мм (рис. 9). Максимальні зворотні

переміщення плити вгору склали 25,3 мм (рис. 10).

На рис. 11 наведено період коливальних переміщень залізобетонної плити під дією вибухового навантаження.

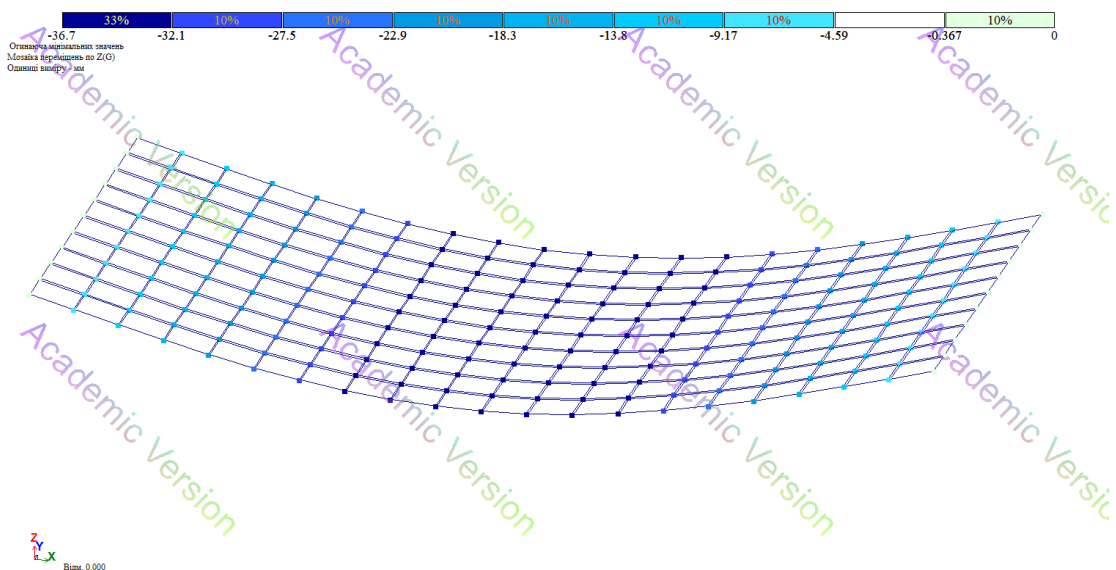


Рисунок 9 – Мозаїка максимальних переміщень плити до низу (36,7 мм)

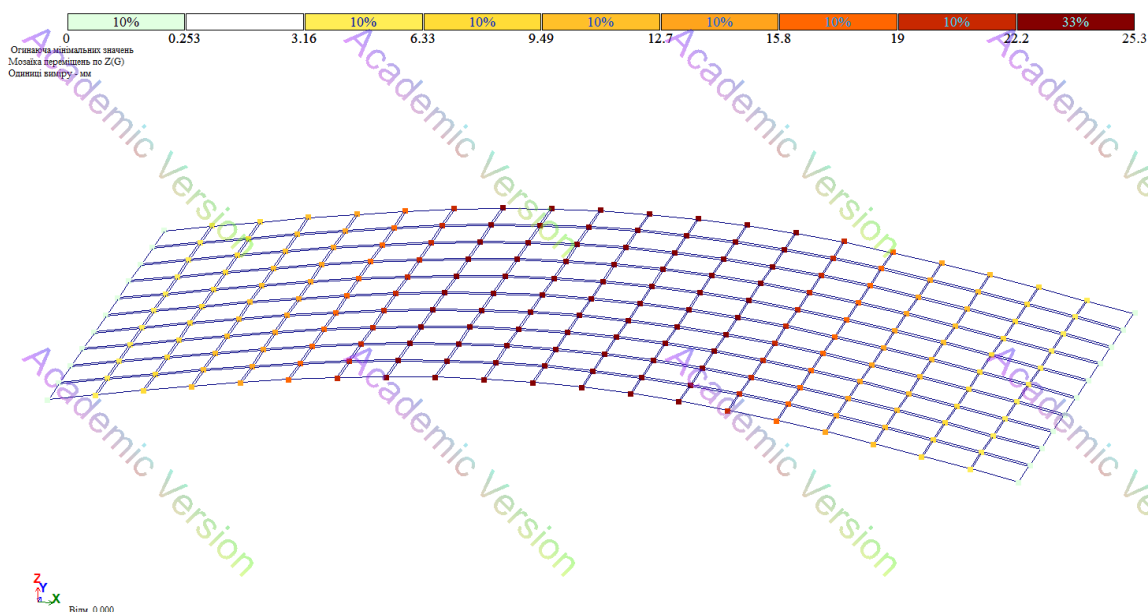


Рисунок 10 – Мозаїка зворотніх максимальних переміщень плити вгору (25,3 мм)

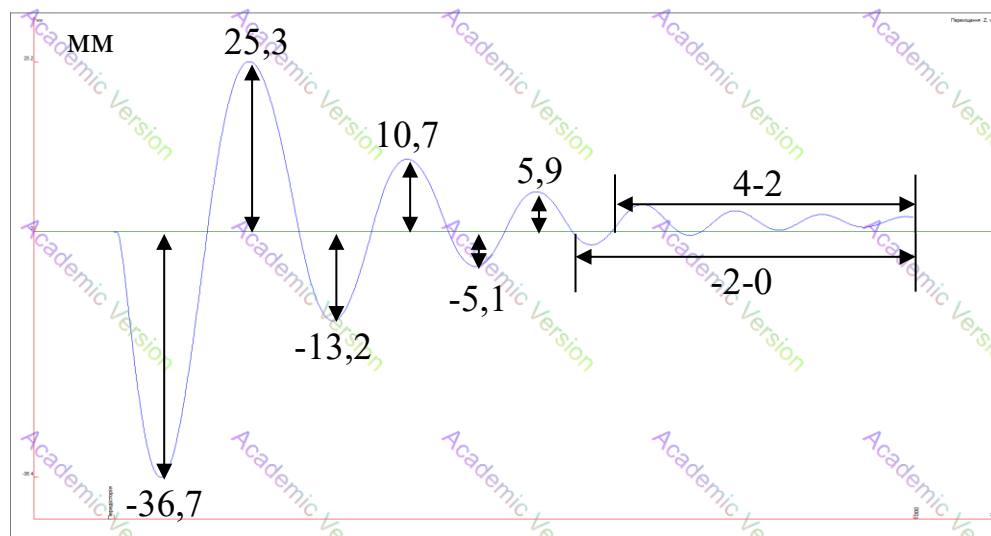


Рисунок 11 – Період коливань залізобетонної плити під дією вибухового навантаження

В таблиці 4 наведено порівняння максимальних переміщень за експериментом і чисельним моделюванням.

Таблиця 4 – Порівняння максимальних переміщень за експериментом і чисельним моделюванням

Будівельна конструкція	Відбитий тиск вибуху, кПа	Переміщення сталевго двотавра від вибуху, мм		Відносна похибка, %
		Експеримент	Моделювання	
Плита перекриття, 2000x100x100	1185	41	36,7	10,49

З урахуванням прийнятих припущень щодо спрощеного задання вибухового навантаження у вигляді рівномірно розподіленого тиску та використання нелінійних моделей матеріалів, рівень збіжності моделі з експериментом є прийнятним для задач нелінійної вибухової динаміки залізобетонних конструкцій.

Отримані результати моделювання підтвердили здатність побудованої скінченно-елементної моделі відтворювати основні параметри роботи плити при імпульсному вибуховому навантаженні. Зокрема, чисельно визначене максимальне переміщення плити вниз становило 36,7 мм, що узгоджується з експериментальним значенням 41 мм (відносна похибка 10,49 %). Модель

коректно відтворює характер напружено-деформованого стану та коливальний відгук плити після проходження позитивної фази імпульсу.

Висновки та напрями подальших досліджень. 1. На основі результатів повномасштабних експериментальних досліджень проаналізовано динамічну реакцію залізобетонної плити перекриття розмірами 2000×1000×75 мм при дії вибухового навантаження. Встановлено, що за вибуху заряду тринітротолуолу масою 8 кг, масштабованій відстані 0,5 м/кг^{1/3} та тривалості позитивної фази 4,2 мс відбитий тиск вибухової хвилі становив 1185 кПа, а падаючий – 307 кПа. За результатами експерименту руйнування плити не зафіксовано, а максимальне вертикальне переміщення вниз становило 41 мм.

2. Розроблено скінченно-елементну модель плити в LIRA-FEM з урахуванням фізичної та геометричної нелінійності, фактичної схеми армування (1,4 %) та характеристик матеріалів: бетон – модуль пружності 51 503 МПа, коефіцієнт

Пуассона 0,20, міцність 128,9 МПа, густина 2424,9 кг/м³; арматура – сталь Ø15,2 мм з міцністю 1750 МПа. Виконано модальний аналіз, що дало змогу врахувати коливальний характер роботи плити при дії вибухового навантаження.

3. За результатами чисельного моделювання встановлено, що максимальний прогин плити в напрямку дії вибухового навантаження становив 36,7 мм, а максимальне зворотне переміщення вгору – 25,3 мм. Відхилення між чисельними та експериментальними даними за величиною максимального прогину не перевищує 10,49 %, що підтверджує достатню точність розробленої моделі та її придатність для відтворення динамічної реакції залізобетонної плити при імпульсному вибуховому навантаженні.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на вивчення впливу маси вибухової речовини, тривалості імпульсу, умов обпирання та армування на напружено-деформований стан і переміщення залізобетонних плит перекриття.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Momeni, M., Hadianfard, M. A., Bedon, C., & Baghlani, A. (2019, August). Numerical damage evaluation assessment of blast loaded steel columns with similar section properties. In *Structures* (Vol. 20, pp. 189–203). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.04.002>.
2. Minh Thanh, V., Santosa, S. P., Widagdo, D., & Putra, I. S. (2016). Steel plate behavior under blast loading-numerical approach using LS-Dyna. *Applied Mechanics and Materials*, 842, 200–207. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.842.200>.
3. Han, Y., & Liu, H. (2015). Finite element simulation of medium-range blast loading using LS-DYNA. *Shock and Vibration*, 2015(1), 631493. <https://doi.org/10.1155/2015/631493>.
4. Nawar, M. T., El-Zohairy, A., & Arafa, I. T. (2023). Finite Element Modeling and Analysis of Perforated Steel Members under Blast Loading. *Modelling*, 4(4), 628–649. <https://doi.org/10.3390/modelling4040036>.
5. Abdallah, M. M., & Osman, B. H. (2014). Numerical analysis of steel building under blast loading. *International journal of Engineering Research and Technology*, 3(11), 1629–1634. DOI: 10.17577/IJERTV3IS110846.
6. Chen, H. & Liew, J. Y. (2005). Explosion and fire analysis of steel frames using a mixed element approach. *Journal of Engineering Mechanics*, 131, 6, 606–616. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9399\(2005\)131:6\(606\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9399(2005)131:6(606)).
7. Shope, R. L. (2006). Response of wide flange steel columns subjected to constant axial load and lateral blast load. The Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, VA, USA. https://www.researchgate.net/publication/277745578_Response_of_Wide_Flange_Steel_Columns_Subjected_to_Constant_Axial_Load_and_Lateral_Blast_Load.
8. Liew, J. Y. R. (2008). Survivability of steel frame structures subject to blast and fire. *Journal of Constructional Steel Research*, 64, 7–8, 854–866. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2007.12.013>.
9. Al-Thairy, H. (2018). Behaviour and failure of steel columns subjected to blast loads: Numerical study and analytical approach. *Advances in Materials Science and Engineering*, 1, 1591384. <https://doi.org/10.1155/2018/1591384>.
10. Yan, S., Qi, B. X., Yan, H., & Yang, L. (2012). Numerical simulation on failure modes of light steel columns under high temperature and explosion. *Applied Mechanics and Materials*, 204, 3351–3356. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.204-208.3351>.
11. Lee, K., Kim, T., & Kim, J. (2009). Local response of W-shaped steel columns under blast loading. *Structural Engineering and Mechanics*, 31, 1, 25–38. <https://doi.org/10.12989/sem.2009.31.1.025>, 2-s2.0-58149197919.
12. Kovalov, A., Purdenko, R., Otrosh, Y., Tomenko, V., Rashkevich, N., Shcholokov, E., Pidhornyy, M., Zolotova, N., & Suprun, O. (2022). Assessment of fire resistance of fireproof reinforced concrete structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5, 1(119), 53–61. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266219>.
13. Otrosh Ю. А., Ковальов А. І., Пурденко Р. Р., Рашкевич Н. В., Майборода Р. І. Вогнестійкість вогнезахисних залізобетонних конструкцій для підвищення рівня пожежної безпеки. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2022. № 36. С. 102–122. <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/17038>.

14. Пурденко Р. Р., Отрош Ю. А., Рашкевич Н. В., Сур'янінов В. М. Моделирование стійкості та надійності системи ґрунт-фундамент-будівля при дії силових та високотемпературних впливів. *Механіка та математичні методи*. 2024. VI/1/2024. С. 36–48. <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2024-6-1-36-48>.
15. Li, J., Wu, C., & Hao, H. (2015). An experimental and numerical study of reinforced ultra-high performance concrete slabs under blast loads. *Materials and Design*, 82, 64–76. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.05.045>.

REFERENCE

1. Momeni, M., Hadianfard, M. A., Bedon, C., & Baghlani, A. (2019, August). Numerical damage evaluation assessment of blast loaded steel columns with similar section properties. In *Structures* (Vol. 20, pp. 189–203). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.04.002>.
2. Minh Thanh, V., Santosa, S. P., Widagdo, D., & Putra, I. S. (2016). Steel plate behavior under blast loading-numerical approach using LS-Dyna. *Applied Mechanics and Materials*, 842, 200–207. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.842.200>.
3. Han, Y., & Liu, H. (2015). Finite element simulation of medium-range blast loading using LS-DYNA. *Shock and Vibration*, 2015(1), 631493. <https://doi.org/10.1155/2015/631493>.
4. Nawar, M. T., El-Zohairy, A., & Arafa, I. T. (2023). Finite Element Modeling and Analysis of Perforated Steel Members under Blast Loading. *Modelling*, 4(4), 628–649. <https://doi.org/10.3390/modelling4040036>.
5. Abdallah, M. M., & Osman, B. H. (2014). Numerical analysis of steel building under blast loading. *International journal of Engineering Research and Technology*, 3(11), 1629–1634. DOI: 10.17577/IJERTV3IS110846.
6. Chen, H. & Liew, J. Y. (2005). Explosion and fire analysis of steel frames using a mixed element approach. *Journal of Engineering Mechanics*, 131, 6, 606–616. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9399\(2005\)131:6\(606\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9399(2005)131:6(606)).
7. Shope, R. L. (2006). Response of wide flange steel columns subjected to constant axial load and lateral blast load. The Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, VA, USA. https://www.researchgate.net/publication/277745578_Response_of_Wide_Flange_Steel_Columns_Subjected_to_Constant_Axial_Load_and_Lateral_Blast_Load.
8. Liew, J. Y. R. (2008). Survivability of steel frame structures subject to blast and fire. *Journal of Constructional Steel Research*, 64, 7–8, 854–866. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2007.12.013>.
9. Al-Thairy, H. (2018). Behaviour and failure of steel columns subjected to blast loads: Numerical study and analytical approach. *Advances in Materials Science and Engineering*, 1, 1591384. <https://doi.org/10.1155/2018/1591384>.
10. Yan, S., Qi, B. X., Yan, H., & Yang, L. (2012). Numerical simulation on failure modes of light steel columns under high temperature and explosion. *Applied Mechanics and Materials*, 204, 3351–3356. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.204-208.3351>.
11. Lee, K., Kim, T., & Kim, J. (2009). Local response of W-shaped steel columns under blast loading. *Structural Engineering and Mechanics*, 31, 1, 25–38. <https://doi.org/10.12989/sem.2009.31.1.025>, 2-s2.0-58149197919.
12. Kovalov, A., Purdenko, R., Otrosh, Y., Tomenko, V., Rashkevich, N., Shcholokov, E., Pidhornyy, M., Zolotova, N., & Suprun, O. (2022). Assessment of fire resistance of fireproof reinforced concrete structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5, 1(119), 53–61. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266219>.
13. Otrosh, Yu. A., Koval'ov, A. I., Purdenko, R. R., Rashkevich, N. V., & Mayboroda, R. I. (2022). Vohnestiykist' vohnnezakhyshchennykh zalizobetonnykh konstruktsey dlya pidvyshchennya rivnya pidvyshchennya bezpeky. *Problemy nadzvychaynykh sytuatsiy*, 36, 102–122. <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/17038>.
14. Purdenko, R. R., Otrosh, Yu. A., Rashkevich, N. V., & Sur'yaninov, V. M. (2024). Modelyuvannya stiykosti ta nadiynosti systemy hrunt-fundament-budivlya pry diyi sylovykh ta vysokotemperaturnykh vplyviv. *Mekhanika ta matematychni metody*, VI/1/2024, 36–48. <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2024-6-1-36-48>.
15. Li, J., Wu, C., & Hao, H. (2015). An experimental and numerical study of reinforced ultra-high performance concrete slabs under blast loads. *Materials and Design*, 82, 64–76. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.05.045>.

MODELING THE DYNAMIC BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE FLOOR SLABS UNDER IMPULSIVE BLAST LOADING

N. Rashkevich, R. Purdenko

National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine

KEYWORDS

reinforced concrete floor slab, blast loading, impulsive action, stress–strain state, finite element modeling, LIRA-FEM.

ABSTRACT

The study investigates the dynamic behavior of a reinforced concrete floor slab under impulsive blast loading. The relevance of the research is determined by the need to enhance the reliability and safety of building structures under extreme loads that may result from technogenic accidents or military impacts. Under such conditions, the use of numerical methods allows reproducing the stress–strain state of structures and predicting their behavior without conducting a large number of costly experimental tests. The study uses the results of full-scale experimental tests of reinforced concrete slabs subjected to the explosion of a trinitrotoluene charge. Based on the experimental data, the geometric parameters of the slab, reinforcement layout, properties of concrete and reinforcing steel, as well as the support boundary conditions were reproduced. Numerical modeling was performed in the LIRA-FEM software package within the framework of a non-stationary dynamic analysis considering both physical and geometric nonlinearities of materials. A nonlinear stress–strain diagram was adopted for concrete, while an elastic–plastic model with the yield strength consideration was used for reinforcing steel. The initial stress–strain state of the structure was formed through a preliminary static analysis. To determine the dynamic characteristics of the slab, a modal analysis was performed, which made it possible to identify the natural frequencies and corresponding vibration modes, as well as to determine the damping parameters. In the numerical model, the blast load was applied as a uniformly distributed impulsive pressure over the slab surface, which allows accounting for the integral force effect of the blast wave. The obtained numerical simulation results were compared with the experimental data. It was found that the maximum slab deflection obtained in the numerical analysis is 36.7 mm, while the experimental value is 41 mm. The relative deviation does not exceed 10.49 %, indicating an acceptable level of agreement between the results. The developed model adequately reproduces the stress–strain state and the vibration response of the reinforced concrete slab under impulsive blast loading. The obtained results can be used for further studies on the influence of blast parameters and structural characteristics on the performance of reinforced concrete elements

УДК 614.843

СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ ЩОДО СПОСОБІВ ТА ЗАСОБІВ ГЕНЕРАЦІЇ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ

DOI: 10.52363/2518-1777-2026-21-3

Осадчук М. В., ORCID iD 0000-0002-4584-3541

E-mail: maximusfire1989@gmail.com

Інститут наукових досліджень з цивільного захисту НУЦЗ України, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції:

30.04.2026

Прийнято: 05.05.2026

Опубліковано:

30.05.2026

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

вогнегасні речовини,
пінозмішувач, гідродинаміка,
компресійна піна, перспективи
використання, способи
одержання

АНОТАЦІЯ

У представленій статті проведено комплексний системний аналітичний огляд найбільш поширених у світовій практиці науково-прикладних підходів до процесу формування компресійної піни в системах типу CAFS (Compressed Air Foam Systems). Детально проаналізовано конструктивні особливості та фундаментальні гідродинамічні принципи функціонування основних типів пінозмішувальних пристроїв, що використовуються в сучасних технологіях пожежогасіння. Зокрема, розглянуто вертикальні, коаксіальні та Т-подібні змішувачі, а також статичні системи, оснащені різноманітними типами насадкових елементів. У ході дослідження виявлено та систематизовано ключові технічні недоліки існуючих рішень, значний гідравлічний опір статичних систем, прискорений механічний знос сітчастих елементів та схильність до засмічення. Ці фактори суттєво обмежують стабільність фізико-хімічних параметрів компресійної піни, її кратність та максимальну дистанцію ефективної подачі вогнегасної речовини. На основі результатів аналізу в роботі теоретично обґрунтовано інноваційний принцип безлопатевого генерування компресійної піни. В основу запропонованого методу покладено використання ефектів адгезії та тертя у граничному шарі робочого середовища, що реалізується за аналогією з принципом роботи турбіни Ніколи Тесли. Даний підхід є унікальним для галузі пожежної безпеки, оскільки дозволяє мінімізувати механічний вплив на структуру компресійної піни під час її формування. У статті описано фізичний механізм роботи конструкції з перфорованим барабаном. Встановлено, що така конфігурація забезпечує високий ступінь гомогенності вогнегасної речовини завдяки кавітаційному подрібненню суміші в мікрошарах між дисками, стінками та в отворах перфорації. Визначено ключові експлуатаційні переваги розробленої технології, серед яких мінімальні гідравлічні втрати, підвищена надійність завдяки відсутності складних лопатевих механізмів та конструктивна універсальність. Результати дослідження підтверджують можливість ефективної інтеграції запропонованих генераторів у мобільні пожежні розрахунки та стаціонарні системи автоматичного протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури, складських комплексів та підприємств нафтохімічної промисловості. Дана робота відкриває нові перспективи для створення обладнання нового покоління для ліквідації пожеж класів А та В.

Постановка проблеми. Сучасний етап розвитку технологій у сфері пожежогасіння характеризується не тільки вдосконаленням пожежно-рятувальної техніки [1], а також інтенсивною модернізацією засобів пожежогасіння, вогнегасних речовин та методів їх отримання, на зміну застарілим. Зокрема повітряно-механічній піні [2,3], що

утворюється шляхом ежекції атмосферного повітря в потік водного розчину піноутворювача за нормального тиску з подальшим спінюванням у піногенераторі. Однак зазначений спосіб формування піни має ряд недоліків, серед яких недостатня однорідність структури піни та нестабільність показника кратності, що

знижує ефективність застосування в окремих умовах.

У зв'язку з цим на сьогодні активно впроваджується технологія примусового насичення розчину піноутворювача стисненим повітрям за допомогою компресорного обладнання.[4] Такі системи отримали назву “Compressed Air Foam System” (CAFS) і розглядаються, як перспективний напрямок для підвищення ефективності пожежогасіння.

Поряд із перевагами, зазначений метод генерації компресійної піни характеризується низкою конструктивних та технологічних обмежень. Першочергово це виявляється у високій вузькопрофільності обладнання, кожна окрема установка та її термодинамічний принцип піноутворення адаптовані під вузький спектр завдань. Зокрема, існують суттєві конструктивні відмінності у генеруванні компресійної піни між мобільними ранцевими пристроями та великогабаритними стаціонарними системами протипожежного захисту. Через відсутність уніфікації вузлів змішування, дані технологічні рішення є технічно несумісні та не підлягають взаємній інтеграції чи оперативній заміні в межах єдиної системи.

Крім того, актуальним залишається питання стабільності отриманої вогнегасної речовини, що безпосередньо впливає на її вогнегасні властивості та стійкість до руйнування при контакті з розігрітими поверхнями.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У статті [4] проведено комплексний аналіз існуючих технологій генерації піни та визначено перспективні напрямки їх розвитку для захисту критичної інфраструктури. Автор акцентує увагу на необхідності модернізації обладнання для розширення функціональних можливостей компресійних систем у сучасних умовах.

У роботі [5] досліджено критичний вплив тиску повітря та витрати розчину піноутворювача на кінцеві характеристики вогнегасної речовини. Автори встановлюють математичні залежності, які

дозволяють прогнозувати кратність піни залежно від динамічних змін робочих параметрів генеруючої установки.

Публікація [6] присвячена інженерним аспектам проектування систем CAFS, де основна увага приділяється гідродинамічним процесам в середині змішувальних камер. Робота обґрунтовує необхідність врахування стадій формування піни для створення надійних стаціонарних та мобільних систем пожежогасіння.

Фундаментальне дослідження [7] у якому детально відпрацьовано оптимальні рецептури піноутворювачів для отримання стійкої компресійної піни. Звіт містить результати численних лабораторних випробувань, що стали базою для подальшого впровадження технології CAFS в Україні.

Автори публікації [8] аналізують методики інтенсифікації гасіння твердих горючих матеріалів шляхом оптимізації структури компресійної піни. У статті доведено, що висока адгезійна здатність та змочувальна властивість піни дозволяють значно скоротити час ліквідації осередків пожеж класу А.

Експериментальне дослідження [9] зосереджене на визначенні фізичної стабільності та кратності піни, отриманої методом примусового нагнітання повітря. Автори надають порівняльну характеристику стійкості піни до руйнування, що є важливим для оцінки її вогнегасної тривалості.

Робота [10] досліджує специфіку застосування компресійної піни при реалізації «підшарового» способу гасіння, зокрема для резервуарів із паливом. Встановлено параметри спливання пінних мас та їх здатність до формування ізолюючого шару на поверхні дзеркала горіння в умовах протитиску.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою роботи є проведення системного аналізу світових науково-практичних підходів до генерації компресійної піни, а також виявлення їхніх конструктивних переваг, експлуатаційних недоліків та технологічних особливостей. На

основі отриманих результатів запропонувати ідею щодо інноваційного принципу формування компресійної піни, яка має велику універсальність та покращені показниками вогнегасної ефективності, а також експлуатаційні характеристики, що зумовлює перспективу його впровадження у сучасні системи протипожежного захисту.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети застосовано комплексний підхід, що базується на системному аналізі та узагальненні світового науково-практичного досвіду у сфері проектування систем CAFS. Зокрема метод системного огляду використано для критичної оцінки технічних недоліків сучасних вертикальних, коаксіальних та статичних змішувачів. методи фізичного моделювання, що лягли в основу розробки механізму гомогенізації суміші за рахунок кавітаційних процесів у мікрошарах та методи класифікації та порівняння, що дозволили обґрунтувати переваги використання адгезії та в'язкісного тертя над традиційними методами турбулізації потоку.

Виклад основного матеріалу дослідження. Компресійна піна (Compressed Air Foam, CAF) - Двофазна високодисперсна газорідинна система, сформована в установках типу CAFS шляхом примусового турбулентного змішування водного розчину піноутворювача зі стисненим повітрям у замкнутому гідропневматичному середовищі, у результаті чого утворюється структурована піна з регульованими параметрами кратності, щільності, стабілізована поверхнево-активними речовинами.

Процес змішування повітряного потоку з водним розчином піноутворювача, а також конструктивне виконання та геометричні параметри камери в якій відбувається змішування є основними факторами у формуванні структури та вогнегасної ефективності компресійної піни.

За результатами узагальненого аналізу діючих способів змішування встановлено два основні принципи в

залежності від напрямку руху повітря, яке подається до розчину піноутворювача, а саме із вертикально орієнтованим введенням повітряного потоку та з коаксіальною схемою подачі [11-14].

Нижче наведені визначення, характеристики, принципи роботи, основних пінозмішувачів компресійної піни.

Принцип роботи вертикального перемішування у CAFS заключається в динамічному русі двофазного потоку в каналі з осьовою симетрією з переважно вертикальною орієнтацією, у якому розчин піноутворювача та стисненого повітря транспортується вздовж поздовжньої осі, а формування структури піни забезпечується контрольованими гідродинамічними механізмами [15].

Основними недоліками вертикального способу формування компресійної піни є обмежена інтенсивність турбулізації двофазного потоку, що за умов ламінарного руху може призводити до недостатньої гомогенізації та нерівномірної дисперсності бульбашок. Крім того, пряма вертикальна траєкторія вздовж поздовжньої осі мінімізує механічний вплив на фазову межу, що вимагає збільшення довжини змішувальної камери для досягнення стабільної кратності піни.

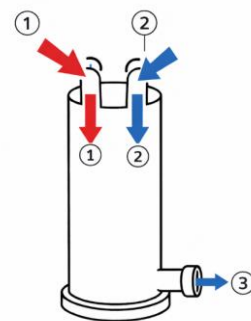


Рисунок 1 – Вертикальний пінозмішувач: 1 - піноутворювач; 2-стиснене повітря; 3 - вихід готової компресійної піни

Коаксіальний пінозмішувач у CAFS працює за принципом осьового підведення однієї фази розчину піноутворювача через центральний канал та подачі стисненого повітря через кільцевий міжтрубний простір з подальшою радіальною

інжекцією повітря в рідинний потік. У зоні змішування відбувається інтенсивне розсіювання повітря в рідині, формування газорідної структури та стабілізація піни перед її виходом із змішувача [12, 13].

Основним недоліком коаксіальної схеми є виникнення значних градієнтів тиску, що спричиняє нерівномірне насичення центральної частини рідинного потоку повітряною фазою. Такий механізм змішування зумовлює високу чутливість системи до коливань витрат компонентів, що за певних гідравлічних режимів призводить до пульсацій тиску та утворення піни з нестабільними показниками кратності.

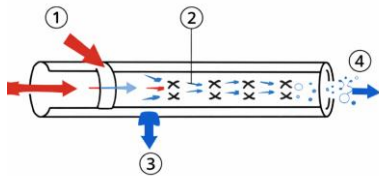


Рисунок 2 – Коаксіальний пінозмішувач: 1-піноутворювач; 2-стиснене повітря; 3-зона змішування; 4- вихід готової компресійної піни

Конструктивне виконання Т-подібного пінозмішувача характеризується простотою будовою та мінімальною кількістю функціональних елементів, значною перевагою є зручність технічного обслуговування та експлуатації.

Недоліком Т-подібної схеми є виникнення суттєвої асиметрії поля швидкостей у зоні зіткнення фаз, що призводить до нерівномірного розподілу газової складової за перерізом змішувальної камери. Такий механізм інжекції спричиняє зростання гідравлічного опору та сприяє утворенню великодисперсної структури піни через недостатню площу контакту фаз.

Процес змішування в Т-подібному пінозмішувачі може реалізовуватися за кількома конструктивними схемами. У першому варіанті [16] стиснене повітря подається єдиним потоком через окремих канал, при цьому механізм формування

піни класифікується, як схема повітря зовні, а рідина всередині, що відображає характер взаємодії фаз у зоні контакту. На рисунку 3 зображена така схема.

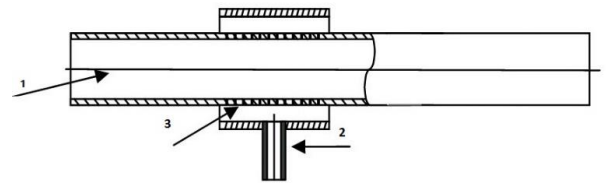


Рисунок 3 – Схема перемішування типу «Повітря зовні, рідина всередині»: 1 – трубопровід для розчину піноутворювача; 2 – трубопровід для стисненого повітря; 3 – отвори для входу повітря у трубопровід з розчином ПУ

Інший варіант Т-подібної схеми змішування [12, 13] передбачає подавання стисненого повітря не суцільним потоком через один отвір, як у попередньому випадку, а через велику кількість малих отворів. Це забезпечує збільшення кількості зон контакту повітря з водним розчином піноутворювача та інтенсифікує процес масообміну. Такий спосіб сприяє більш рівномірному перемішуванню пінозмішувача з повітрям та підвищує ефективність формування необхідної суміші.

У зазначеній конфігурації повітря подається вертикально через окремих трубопровід, інтегрований у нижню частину пінозмішувача, де відбувається процес змішування. Кінець трубопроводу герметично заглушений, а по його довжині виконано низку малих перфораційних отворів, через які здійснюється дисперсне введення повітря в рідинне середовище. На рисунку 4 наведено Схему процесу перемішування з введенням трубопроводу на центральній осі, а на рисунку 5 зображено схему змішування у якому трубопровід розміщено під кутом.

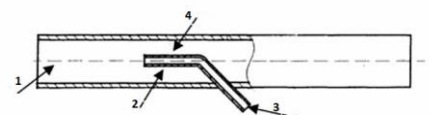


Рисунок 4 – Схема змішування на осі: 1 – трубопровід для розчину піноутворювача; 3 – трубопровід для стисненого повітря; 2, 4 – маленькі отвори для входу повітря у трубопровід з розчином ПУ

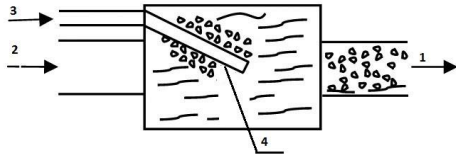


Рисунок 5 – Схема змішування під кутом:
1 – вихід готової піни; 2 – трубопровід для стисненого повітря; 3 – трубопровід для розчину піноутворювача; 4 – отвори для контакту повітря з розчином ПУ

Ще одним способом є утворення піни, що відбувається внаслідок проходження суміші стисненого повітря та розчину піноутворювача крізь пористі структури або інші елементи, розміщені у статичних змішувачів. На рисунках 6-9 подано приклади статичних змішувачів різних конструктивних виконань, що можуть застосовуватися для утворення компресійної піни [14, 17-19].



Рисунок 6 – Змішувач з нерегулярними насадковими елементами



Рисунок 7 – Змішувач з гвинтовими елементами



Рисунок 8 – Змішувач з елементами гофрованих пластин [19]



Рисунок 9 -Тип конструкцій з лезами

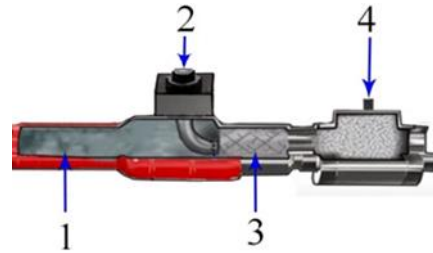


Рисунок 10 – Механізм формування компресійної піни за допомогою статичного змішувача 1– розчин піноутворювача; 2 – отвір для подачі повітря; 3 – статичний змішувач; 4 – готова компресійна піна [20]

Пристрій для генерування піни [21], на рисунку 11 забезпечує високоякісне перемішування розчину і повітря для отримання піни без обмеження потоку рідини через пристрій.

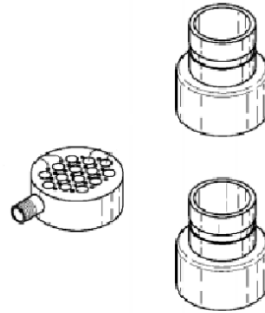


Рисунок 11 – Пристрій для генерування піни

Повітряний колектор має канали, через які проходить потік води або розчину, а також має отвори, які вводять стиснене повітря паралельно потоку води або розчином, що вводиться у вихідну камеру.

Площа поперечного перерізу проходів, щонайменше, така ж, як і вхід для води або розчину тому пристрій не обмежує потік рідини навіть у тому випадку, коли потрібно прямий потік води або розчину без змішаного повітря.

Черговий варіант [22] на рисунках 12 та 13 пропонує пристрій формування бульбашок, який генерує бульбашки шляхом змішування повітря з сумішшю води з піноутворювачем та забезпечує подальший потік бульбашок через сопло. Винахід включає корпус, який має передню кришку і задню кришку, з'єднану з передньою кришкою. Передня кришка має сопло, яке має прохід. Задня кришка

закриває певний простір через який транспортується вироблена піна. З'єднувальна трубка з'єднана із задньою кришкою і має наскрізний отвір.

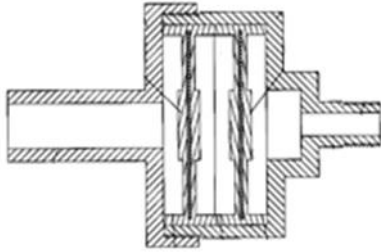


Рисунок 12 – Пристрій для формування бульбашок (1)

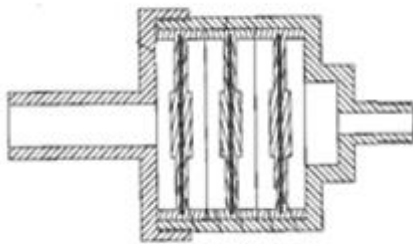


Рисунок 13 – Пристрій для формування бульбашок (2)

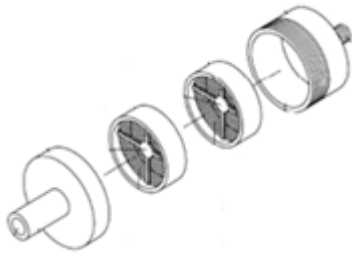
Сполучна трубка має різьбу для з'єднання з розпилювачем. Блок формування бульбашок має перший сітчастий елемент і другий сітчастий елемент, обидва з яких розташовані у просторовому об'ємі. Кожен з першого і другого елементів сітки має направляючу пластину, розташовану перпендикулярно потоку, щоб направляти повітря для радіального розширення.

Порожнина, в якій розташовані елементи генерації піни, забезпечується пониженим тиском завдяки розширенню газорідної суміші. Бульбашки генеруються першим та другим сітчастими елементами.

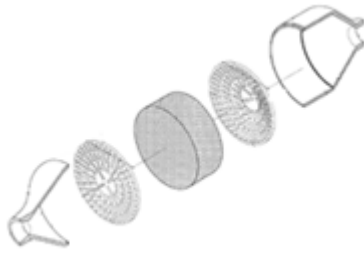
Є низка конструктивних рішень з певними недоліками, яких слід уникати. Наприклад, широко розповсюдженої конструкцією є пристрої для створення

пневматичного створення піни, що пов'язані з пістолетом високого тиску де піноутворюючий засіб перетворюється в туман, який всмоктується в пристрій с подальшим утворенням бульбашок. Пристрій генерування бульбашок включає в себе губки або неткані тканини, які мають в собі кілька отворів, піноутворюючий засіб, що проходить через губку або неткані тканини для отримання бульбашок, які потім розпилюються під високим тиском. Однак генерація бульбашок не виконується, тому що отвори розташовані випадковим чином, а зламані бульбашки і туман залишають значну кількість піноутворювача в отворах, і піноутворюючий засіб тече між отворами і утворюючи бульбашкову плівку з іншим детергентом в інших отворах. Плівка вдувається в бульбашки, які легше повітря, так що бульбашки доставляються на велику відстань. Піноутворюючий засіб розпорошується повітряним потоком високого тиску і утворює крихітні бульбашки. Маленькі бульбашки легко випаровуються і ламаються, тому вони не прикріплюються до об'єктів пожежогасіння. Губки, неткані тканини або деформуються ударом потоків високого тиску або неткані тканини роблять отвори нерівними, які впливають на потік повітря і піноутворюючого засобу. Крім того, губки або неткані тканини легко зношуються і не можуть бути повністю очищені. Губки або неткані тканини поступово перетворюються на шматки, які не можуть утворити достатню кількість бульбашок. Таких конструктивних рішень необхідно уникати.

У наступному варіанті рисунку 14 розкрита система створення піни зі стисненим повітрям CAFS, що містить контролер системи, призначений для управління клапаном-регулятором витрати повітря в залежності від сигналів, які забезпечуються витратоміром води і витратоміром повітря, з метою збереження співвідношення між потоком повітря і потоком піни на підставі введення їх співвідношення, регульованого користувачем.



а – склад генератора



б – приклад розташування сіток генератора

Рисунок 14 – Схема розташування елементів утворення бульбашок

Провівши детальний аналітичний огляд [4-10] оцінивши переваги та недоліки існуючих принципів формування компресійної піни запропоновано інноваційну технологію генерування компресійної піни, в основу якої покладено принципи безлопатевого нагнітання та перемішування, аналогічні роботі турбіни Н. Тесли, що теоретично повинно усунути один із характерних недоліків існуючих прототипів – покращити витратні характеристики генераторів компресійної піни та зробити застосовування його у стаціонарних системах пожежогасіння. Конструктивне виконання пристрою (рисунок 15) передбачає формування пінної структури у замкненому об'ємі робочої камери, де замість традиційних крильчаток застосовано систему перфорованого барабана.

Механізм піноутворення базується на використанні ефектів адгезії та в'язкості рідини у граничному шарі під час високошвидкісного обертання робочого барабана виникає передача кінетичного імпульсу від поверхні металу до наступних шарів робочого розчину. Це спричиняє інтенсивну турбулізацію та кавітаційне подрібнення повітряно-рідинної суміші у

мікрошарах, що забезпечує високий ступінь гомогенності компресійної піни.

Застосування даного підходу дозволить мінімізувати гідравлічні втрати енергії та досягти високої продуктивності системи. До вагомих експлуатаційних переваг розробленого піногенератора слід віднести його конструктивну універсальність, масогабаритну мобільність та можливість інтеграції, як у переносні, так і у стаціонарні вузли протипожежного захисту.

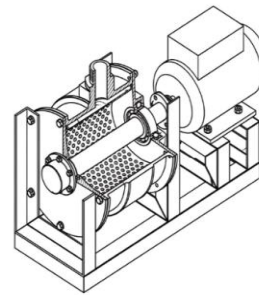


Рисунок 15 – Перфорований барабан для генерації компресійної піни

Висновки та напрями подальших досліджень:

У результаті проведеного аналітичного огляду механізмів формування компресійної піни зроблено такі висновки:

1. Виявлено недоліки сучасних систем CAFS, підвищення якості піни у статичних змішувачах зазвичай призводить до зростання гідравлічного опору системи, що обмежує дистанцію подачі вогнегасної речовини. Доведено, що використання сітчастих або пористих елементів часто призводить до їх швидкого зносу та деформації під дією високого тиску, що погіршує стабільність кратності піни.

2. Теоретично обґрунтовано та запропоновано інноваційний принцип формування компресійної піни на основі використання ефектів адгезії та в'язкісного тертя у граничному шарі. Запропонована конструкція з перфорованим барабаном, що дозволяє замінити механічне

перемішування процесом передачі кінетичного імпульсу в мікросферах рідини.

3. Встановити параметри технічних засобів генерації компресійної піни принцип яких полягає у в'язкості, адгезії та терті у граничному шарі та критерії, які обумовлюють їх вплив на витратні характеристики технічних засобів генерації компресійної піни.

4. Розробити математичні моделі, які описують функціонування технічних засобів генерації компресійної піни принцип роботи яких полягає у в'язкості, адгезії та терті у граничному шарі.

Провести дослідження закономірності витратних характеристик компресійної піни від параметрів технічних засобів її генерації.

5. Розробити методику експериментальних досліджень та провести перевірку розроблених математичних моделей.

6. Розробити технічні вимоги для засобів генерації компресійної піни принцип роботи яких полягає у в'язкості, адгезії та терті у граничному шарі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про визначення загально-світових підходів до класифікаційних вимог щодо пожежних та аварійно-рятувальних автомобілів / С. В. Семичаєвський, В. В. Присяжнюк, М. Л. Якіменко, М. В. Осадчук, В. В. Свірський, К. Г. Белікова. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2025. № 1 (19). С. 44–52.
2. ДСТУ 3789:2015. Піноутворювачі для гасіння пожеж. Загальні технічні вимоги і методи випробування. [Чинний від 2015–07–01]. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2015. 28 с.
3. ДСТУ EN 1568-3:2018. Речовини вогнегасні. Піноутворювачі. Частина 3. Технічні вимоги до піноутворювачів низької кратності для поверхневого гасіння рідин, що не змішуються з водою. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2018. 32 с.
4. Осадчук М. В. Про способи одержання та перспективи використання компресійної піни. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2025. № 2 (20). С. 31–39. DOI: <https://doi.org/10.52363/nvcz.2025.2.31-39>.
5. Залежність властивостей компресійної піни від робочих параметрів процесу генерування піни / А. І. Кодрик, О. Ф. Нікулін, О. М. Тітенко, С. М. Шахов, О. В. Куртов. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2019. № 1. С. 54–63.
6. Виноградов С. А., Кодрик А. І., Тітенко О. М. Проектування систем компресійної піни з урахуванням процесів її формування. *Проблеми надзвичайних ситуацій*: зб. матеріалів доп. Міжнар. наук.–практ. конф. Харків: НУЦЗУ, 2020. С. 192–193.
7. Провести пошукові дослідження з відпрацювання складу вогнегасної речовини у вигляді компресійної піни: звіт про науково-дослідну роботу / УкрНДНЦ. Київ, 2018. 259 с.
8. Шахов С. М., Виноградов С. А., Грищенко Д. В. Аналіз способів підвищення вогнегасної ефективності компресійної піни при гасінні твердих горючих речовин. *Municipal economy of cities. Series: «Economy science»*. 2023. Вип. 1 (175). С. 151–159. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-1-175-151-159>.
9. Дослідження стійкості та кратності компресійної піни / N. Velykyi, V. Kovalyshyn, T. Voitovych, P. Pastukhov. *Пожежна безпека*. 2023. № 43. С. 34–40.
10. Дослідження параметрів компресійної піни при подаванні «підшаровим» способом / V. V. Kovalyshyn, N. R. Velykyi, V. V. Kovalyshyn, A. S. Lyn, P. V. Pastukhov, A. Y. Velykyi. *Пожежна безпека*. 2024. № 45. С. 10–17.
11. Herrick B. J., Baxter M. D. Compressed air foam generator: Pat. US 6276459 B1. 2001.
12. Chu Yingxia. A Experimental study on The Dependent Relationship of Flow Parameters and foam Pattern in CAFS: Thesis. Beijing: Beijing Forestry University, 2005. 35 p.
13. Lin Lin. Property characterization and fire extinguishing efficiency study of the multi-component compressed air foam: Thesis. Beijing: University of Science and Technology of China, 2007. 168 p.
14. Xue Lin. Water-saving and high efficiency firefighting equipment and application technology research: Thesis. Shanghai: Shanghai Fire Research Institute, 2008. 31 p.
15. Deshpande N. S., Barigou M. The flow of gas-liquid foams in vertical pipes. *Chemical Engineering Science*. 2000. Vol. 55, Is. 19. P. 4297–4309. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(00\)00073-7](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(00)00073-7).
16. Laskaris M. A., Sulmone M. Compressed air foam systems: Pat. US 6357532 B1. 2002.
17. Грицина І. М., Грицина Н. І., Левтеров О. А. Схема отримання КП та диспергованої води. *Проблеми пожежної безпеки*. 2016. Вип. 39. С. 78–83.
18. Myers K. J., Bakker D. R. Avoid agitation by selecting static mixers. *Chem Eng Prog*. 1997. Vol. 6. P. 28–38.
19. Taysher W., Mathys P. Paper presented at the first European Conference of Mixing and Centrifugal Separation. Cambridge, England, 1974.
20. Шахов С. М. Використання статичних змішувачів у системах подачі компресійної піни. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій*: зб. матеріалів доп. IX Міжнар. наук.–практ. конф. Черкаси: ЧПБ, 2018. С. 144–145.
21. Krüger T., Dorau G. Method and arrangement for producing compressed air foam for fire-fighting and decontamination: Pat. WO 2006000177 A3. 2006.
22. Carroll G. High flow rate foam generating apparatus: Pat. US 8919745 B1. 2012.

REFERENCES

1. Semychaievskiy, S., Prisyazhniuk, V., Yakimenko, M., Osadchuk, M., Svirskiy, V., & Bielikova, K. (2025). Pro vyznachennia zahalno-svitovykh pidkhdov do klasyfikatsiinykh vymoh shchodo pozhezhnykh ta avariino-riatuvalnykh avtomobiliv [On the definition of global approaches to classification requirements for fire and rescue vehicles]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, 1(19), 44–52.
2. DSTU 3789:2015. (2015). *Pinoutvoriuvachi dlia hasinnia pozhezh. Zahalni tekhnichni vymohy i metody vyprovuvannia* [Foaming agents for fire fighting. General technical requirements and test methods]. Kyiv: DP «UkrNDNTS».
3. DSTU EN 1568-3:2018. (2018). *Rechovyny vohnehasni. Pinoutvoriuvachi. Chastyna 3. Tekhnichni vymohy do pinoutvoriuvachiv nyzkoj kratnosti dlia poverkhnevoho hasinnia ridyn, shcho ne zmishuiutsia z vodoiu* [Fire extinguishing media. Foam concentrates. Part 3. Specification for low expansion foam concentrates for surface application to water-immiscible liquids]. Kyiv: DP «UkrNDNTS».
4. Osadchuk, M. V. (2025). Pro sposoby oderzhannia ta perspektyvy vykorystannia kompresiinoi piny [On the methods of obtaining and prospects of using compressed air foam]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, 2(20), 31–39. <https://doi.org/10.52363/nvcs.2025.2.31-39>.
5. Kodryk, A. I., Nikulin, O. F., Titenko, O. M., Shakhov, S. M., & Kurtov, O. V. (2019). Zalezhnist vlastyivostei kompresiinoi piny vid robochykh parametriv protsesu heneruvannia piny [Dependence of compressed air foam properties on the operating parameters of the foam generation process]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, (1), 54–63..
6. Vynohradov, S. A., Kodryk, A. I., & Titenko, O. M. (2020). Proektuvannia system kompresiinoi piny z urakhuvanniam protsesiv yii formuvannia [Designing compressed air foam systems taking into account the processes of its formation]. *Problemy nadzvychainykh sytuatsii*, 192–193. Kharkiv: NUTSU.
7. UkrNDITSZ. (2018). *Provesty poshukovi doslidzhennia z vidpratsiuvannia skladu vohnehasnoi rechovyny u vyhladi kompresiinoi piny: zvit pro naukovo-doslidnu robotu* [Conduct search research on working out the composition of the fire extinguishing substance in the form of compressed air foam: report on research work]. Kyiv.
8. Shakhov, S. M., Vynohradov, S. A., & Hryshchenko, D. V. (2023). Analiz sposobiv pidvyshchennia vohnehasnoi efektyvnosti kompresiinoi piny pry hasinni tverdykh horiuchykh rechovyn [Analysis of ways to increase the fire-extinguishing efficiency of compressed air foam when extinguishing solid combustible substances]. *Municipal Economy of Cities. Series: «Economy Science»*, 1(175), 151–159. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-1-175-151-159>.
9. Velykyi, N., Kovalyshyn, V., Voitovykh, T., & Pastukhov, P. (2023). Doslidzhennia stiikosti ta kratnosti kompresiinoi piny [Research of stability and expansion ratio of compressed air foam]. *Pozhezhna bezpeka*, 43, 34–40.
10. Kovalyshyn, V. V., Velykyi, N. R., Kovalyshyn, V. V., Lyn, A. S., Pastukhov, P. V., & Velykyi, A. Y. (2024). Doslidzhennia parametriv kompresiinoi piny pry podavanni «pidsharovym» sposobom [Research of parameters of compressed air foam when feeding by "sublayer" method]. *Pozhezhna bezpeka*, 45, 10–17.
11. Herrick, B. J., & Baxter, M. D. (2001). *Compressed air foam generator* (U.S. Patent No. 6,276,459). U.S. Patent and Trademark Office.
12. Chu, Y. (2005). *A Experimental study on the dependent relationship of flow parameters and foam pattern in CAFS* (Master's thesis). Beijing Forestry University, Beijing.
13. Lin, L. (2007). *Property characterization and fire extinguishing efficiency study of the multi-component compressed air foam* (Doctoral dissertation). University of Science and Technology of China, Beijing.
14. Xue, L. (2008). *Water-saving and high efficiency firefighting equipment and application technology research* (Technical report). Shanghai Fire Research Institute, Shanghai.
15. Deshpande, N. S., & Barigou, M. (2000). The flow of gas-liquid foams in vertical pipes. *Chemical Engineering Science*, 55(19), 4297–4309. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(00\)00073-7](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(00)00073-7).
16. Laskaris, M. A., & Sulmone, M. (2002). *Compressed air foam systems* (U.S. Patent No. 6,357,532). U.S. Patent and Trademark Office.
17. Hrytsyna, I. M., Hrytsyna, N. I., & Lievtierov, O. A. (2016). Skhema otrymannia KP ta dysperhovanoi vody [Scheme for obtaining CAF and dispersed water]. *Problemy pozharnoi bezopasnosti*, (39), 78–83.
18. Myers, K. J., & Bakker, D. R. (1997). Avoid agitation by selecting static mixers. *Chemical Engineering Progress*, 6, 28–38.
19. Taysher, W., & Mathys, P. (1974, September 9–11). *Paper presented at the first European Conference of Mixing and Centrifugal Separation*. Cambridge, England.
20. Shakhov, S. M. (2018). Vykorystannia statychnykh zmishuvachiv u syste makh podachi kompresiinoi piny [Use of static mixers in compressed air foam supply systems]. In *Teoriia i praktyka hasinnia pozhezh ta likvidatsii nadzvychainykh sytuatsii: materialy IX Mizhnar. nauk.-prakt. konf.* (pp. 144–145). Cherkasy: CHIPB.
21. Krüger, T., & Dorau, G. (2006). *Method and arrangement for producing compressed air foam for fire-fighting and decontamination* (International Patent No. WO 2006000177 A3). World Intellectual Property Organization.
22. Carroll, G. (2012). *High flow rate foam generating apparatus* (U.S. Patent No. 8,919,745). U.S. Patent and Trademark Office.

CURRENT STATE OF RESEARCH ON METHODS AND DEVICES FOR COMPRESSION FOAM GENERATION

M. Osadchuk

Institute of Scientific Research on Civil Protection of the National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine

KEYWORDS:

fire extinguishing agents, foam proportioner, hydrodynamics, compression foam, prospects for use, methods of production

ABSTRACT

This article presents a comprehensive, systematic analytical review of the most widely used scientific and applied approaches to the process of compressed foam formation in CAFS (Compressed Air Foam Systems). The design features and fundamental hydrodynamic principles of operation of the main types of foam mixing devices used in modern firefighting technologies are analyzed in detail. In particular, vertical, coaxial, and T-shaped mixers are examined, as well as static systems equipped with various types of nozzle elements. The study identified and systematized the key technical shortcomings of existing solutions, including significant hydraulic resistance in static systems, accelerated mechanical wear of mesh elements, and a tendency toward clogging. These factors significantly limit the stability of the physicochemical parameters of the compression foam, its expansion ratio, and the maximum effective delivery distance of the fire extinguishing agent. Based on the results of the analysis, this paper provides a theoretical justification for an innovative principle of blade-less compression foam generation. The proposed method is based on the use of adhesion and friction effects in the boundary layer of the working medium, implemented by analogy with the operating principle of Nikola Tesla's turbine. This approach is unique in the field of fire safety, as it minimizes mechanical impact on the structure of the compression foam during its formation. The article describes the physical mechanism of operation of the perforated drum design. It has been established that this configuration ensures a high degree of homogeneity of the fire-extinguishing agent due to cavitation-induced fragmentation of the mixture in the micro-layers between the discs, walls, and in the perforation holes. The key operational advantages of the developed technology have been identified, including minimal hydraulic losses, increased reliability due to the absence of complex blade mechanisms, and design versatility. The research results confirm the possibility of effectively integrating the proposed generators into mobile firefighting units and stationary automatic fire protection systems for critical infrastructure facilities, warehouse complexes, and petrochemical industry enterprises. This work opens up new prospects for the creation of next-generation equipment for extinguishing Class A and B fires.

УДК 624.012.4

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РОЗМІЩЕННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ КОЛОНИ У МАЛОГАБАРИТНІЙ ВОГНЕВІЙ ПЕЧІ НА РІВНОМІРНІСТЬ НАГРІВАННЯ ЇЇ ПОВЕРХНІ

DOI: 10.52363/2518-1777-2026-21-4

Янішевський В. Е., ORCID iD 0009-0006-2514-6593
E-mail: yanishevskiy.vadym_2021phd@nuczu.edu.ua

Національний університет цивільного захисту України, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції:
10.01.2026

Прийнято: 01.05.2026

Опубліковано:
30.05.2026

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

пожежа, моделювання,
залізобетон, колона,
рівномірність, піч,
конструкція, вогнестійкість,
випробування, температура.

АНОТАЦІЯ

У статті представлено результати дослідження впливу просторового розміщення фрагмента залізобетонної колони в малогабаритній вогневій печі на рівномірність її нагрівання під час стандартного температурного режиму пожежі. Метою роботи є встановлення закономірностей зміни температурного поля по поверхні колони залежно від кута її повороту та відстані до пальників, що впливає на достовірність оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій. Для реалізації поставленої мети створено шість CAD-моделей, що відрізняються геометрією розміщення зразка у камері печі, після чого проведено CFD-моделювання з урахуванням рівнянь Нав'є-Стокса та теплопровідності Фур'є. Під час моделювання забезпечено відтворення стандартного температурного режиму пожежі відповідно до вимог ДСТУ EN 1363-1:2023, що підтверджено отриманими температурними кривими всередині печі. У результаті дослідження встановлено, що конфігурація розміщення зразка у вогневій печі має суттєвий вплив на рівномірність розподілу температурного поля по його поверхні. Зафіксовано, що окремі просторові орієнтації зразка можуть призводити до помітної нерівномірності нагріву, що пов'язано з інтенсивністю теплових потоків і їхньою взаємодією з поверхнею конструкції. Водночас, інші варіанти розташування забезпечують більш стабільний температурний режим з менш вираженими градієнтами. Загалом, симетричне або центральне розміщення зразка сприяє досягненню більш рівномірного нагрівання, тоді як нахил або зміщення відносно осі печі створюють умови для підвищення температурної неоднорідності. Отримані результати мають практичне значення для удосконалення методики проведення вогневих випробувань у малогабаритних вогневих печах та підвищення достовірності визначення межі вогнестійкості залізобетонних конструкцій експериментально-розрахунковим методом. Запропонований підхід дозволяє визначити положення зразків у камері печі, зменшити похибку вимірювань і підвищити відтворюваність експериментів у галузі пожежної безпеки.

Постановка проблеми. Одним із головних завдань у процесі проєктування будівель є забезпечення належного рівня пожежної безпеки та вогнестійкості будівельних конструкцій відповідно до чинних нормативних вимог. Вогнестійкість залізобетонних елементів визначають шляхом проведення стандартних вогневих випробувань у спеціальних печах, де

відтворюють умови пожежі за визначеним температурним режимом. Однак випробувальні установки, методи вимірювань та самі конструктивні елементи мають певні недоліки, що можуть впливати на достовірність результатів. Особливо це стосується малогабаритних печей, які використовують для експериментів у лабораторних умовах,

коли немає можливості випробувати повномасштабний зразок. У таких печах геометрія зразка та його розміщення відносно джерел нагріву суттєво впливають на рівномірність теплового поля й, відповідно, на оцінку температурного стану бетону та арматури.

Сучасні будівельні технології активно застосовують монолітні та збірно-монолітні залізобетонні каркасні системи, де колони відіграють ключову несучу роль. Помилкове визначення їхньої вогнестійкості може призвести до передчасної втрати несучої здатності та прогресуючого руйнування конструкції під час пожежі, що створює загрозу обвалення будівлі й унеможливило безпечну евакуацію людей.

Тому доцільно провести дослідження впливу розміщення залізобетонної колони в малогабаритній вогневій печі на рівномірність її нагрівання. Це дозволить визначити умови проведення експериментів, що підвищать відтворюваність та достовірність результатів. Як результат можливо удосконалити методику оцінювання вогнестійкості залізобетонних колон у малогабаритних вогневих печах.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Вимоги щодо вогнестійкості колон і методів її визначення регламентовано низкою нормативних документів [1–3]. У них визначено порядок проведення випробувань несучих елементів будівель, зокрема, залізобетонних колон на вогнестійкість під дією стандартного температурного режиму пожежі. Зазначено, що під час випробувань необхідно відтворювати умови навантаження за допомогою спеціальних гідравлічних систем. Але можливо проводити експерименти без навантаження у випадках, коли технічно неможливо змодельовати повномасштабну схему. Крім того, стандарти передбачають можливість дослідження фрагментів колон або зразків зменшених розмірів.

Разом з тим, проведення таких випробувань на повномасштабних зразках залізобетонних колон є технічно складним

та фінансово витратним процесом. Як зазначено в роботі [4], використання малогабаритних вогневих установок дозволяє реалізувати експеримент з контрольованими умовами теплового впливу, зокрема для дослідження теплових полів і температурних градієнтів у фрагментах колон. Автор відзначає, що правильне розміщення зразка відносно пальників і стінок печі є ключовим чинником забезпечення рівномірності нагрівання його поверхні.

У роботі [5] розроблено метод на основі передумов, що рекомендуються діючими нормами із проектування залізобетонних конструкцій. Проблема складності застосування нелінійної деформаційної моделі при дослідженні складнодеформованих елементів успішно вирішена шляхом впровадження дволінійних діаграм деформування бетону й арматури та деформаційного критерію міцності. Проте не розглянуто яким чином нагрівання колони може впливати на даний процес.

У дослідженні [6] проаналізовано тепловий вплив пожежі на фрагменти залізобетонних колон на основі їхнього нагрівання за стандартним температурним режимом пожежі у малогабаритній установці для дослідження теплового впливу пожежі на будівельні конструкції. На основі запропонованого способу створено методику, яка дає можливість розрахунковим шляхом оцінити межу вогнестійкості повнорозмірної конструкції. Проте колону було розміщено у центральній частині печі. Тому, залишилось поза увагою питання її зміщення та повороту відносно осі, а також такого впливу на результати експериментів.

У роботі [7] розкрито методику проведення експериментального дослідження щодо визначення вогнестійкості вертикальних несучих будівельних конструкцій. Перевірено розподіл температур по всій площі вогневої печі та проаналізовано отримані результати. Створений прототип вогневої печі дає можливість експериментально

визначати вогнестійкість вертикальних несучих будівельних конструкцій. Проте, акцент зроблено на односторонній обігрів (стіни). Поза увагою залишили питання чотиристороннього обігріву (колони).

У дослідженні [8] розроблено табличний метод оцінювання вогнестійкості залізобетонних колон. Відповідно до основних положень, вона визначається залежно від геометричних параметрів (розміри перерізу, відстань до осі арматури, коефіцієнт армування, довжина або висота елемента), рівня навантаження під час пожежі, умов нагрівання під час пожежі (кількість обігріваних сторін). Проте, залишилось поза увагою те, яким чином матеріали з яких виготовлено колону впливають на результати розрахунку.

У роботі [9] описано експериментально-розрахунковий метод оцінки вогнестійкості залізобетонних колон на основі їх вогневих випробувань. Проте автори пропонують випробувати лише міцність бетону, без урахування арматури, а далі враховувати її вже на етапі розрахунку. Це може приводити до помилкового визначення межі вогнестійкості і непередбачуваний поведінці повномасштабної конструкції під час пожежі.

У дослідженні [10] запропоновано методику визначення режимів нагрівання бетонних зразків, що моделюють стан елементів будівельних конструкцій під час пожежі. Розглянуто різні режими пожежі, проте не розглянуто яким чином навантаження впливає на результати таких випробувань.

Аналіз сучасних досліджень та нормативних документів свідчить, що, попри значну кількість робіт, присвячених визначенню вогнестійкості залізобетонних колон, низка важливих аспектів залишається недостатньо вивченою. Зокрема, більшість експериментальних досліджень спрямовані на оцінювання міцності та деформаційних властивостей матеріалів під час нагрівання, але питання рівномірності температурного поля по поверхні колони практично не

розглядається. Таким чином, необхідно встановити вплив розміщення зразка колони у малогабаритній вогневій печі на рівномірність її нагрівання, оскільки саме цей фактор визначає точність оцінки температурного стану матеріалу, достовірність експериментальних результатів і коректність розрахунку межі вогнестійкості.

Формулювання цілей

дослідження. Метою дослідження є встановлення впливу розміщення залізобетонної колони у малогабаритній вогневій печі на рівномірність нагрівання її поверхні, що визначає відтворюваність та достовірність результатів вогневих випробувань, а також точність оцінювання межі вогнестійкості конструкції.

Для досягнення мети, поставлено та вирішено наступні завдання:

- створити комп'ютерні моделі процесу нагрівання фрагментів колон у малогабаритній вогневій печі;
- провести моделювання нагрівання поверхонь фрагментів колон за стандартним температурним режимом під час різного розміщення зразків;
- проаналізувати розподіли температур по поверхні досліджуваних конструкцій;
- окреслити перспективи подальших досліджень.

Методи дослідження. Для створення геометричних моделей було використано CAD-програмний комплекс. Було створено 6 моделей вогневої печі та будівельної конструкції всередині. На рис. 1 представлено загальний вигляд розміщення колон у камері печі та вказано 2 параметри (a та b).

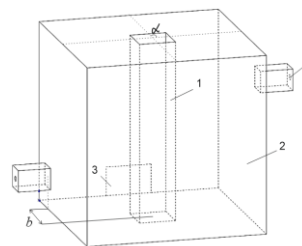


Рисунок 1 – Параметри CAD-моделі камери вогневої печі та фрагменту

залізобетонної колони: 1 – залізобетонна колона; 2 – камера печі; 3 – отвір для відведення продуктів горіння; 4 – пальник; α – кут повороту колони відносно повздовжньої осі; b – відстань від центру колони до пальника.

3-D модель, що показана на рис. 1. відображає загальний вигляд. На рис. 2

представлено 6 CAD-моделей, які було використано під час дослідження рівномірності нагрівання поверхні залізобетонної колони у малогабаритній вогневій печі. Змінювали кут повороту колони та відстань від пальників до конструкції, а також їхнє розміщення.

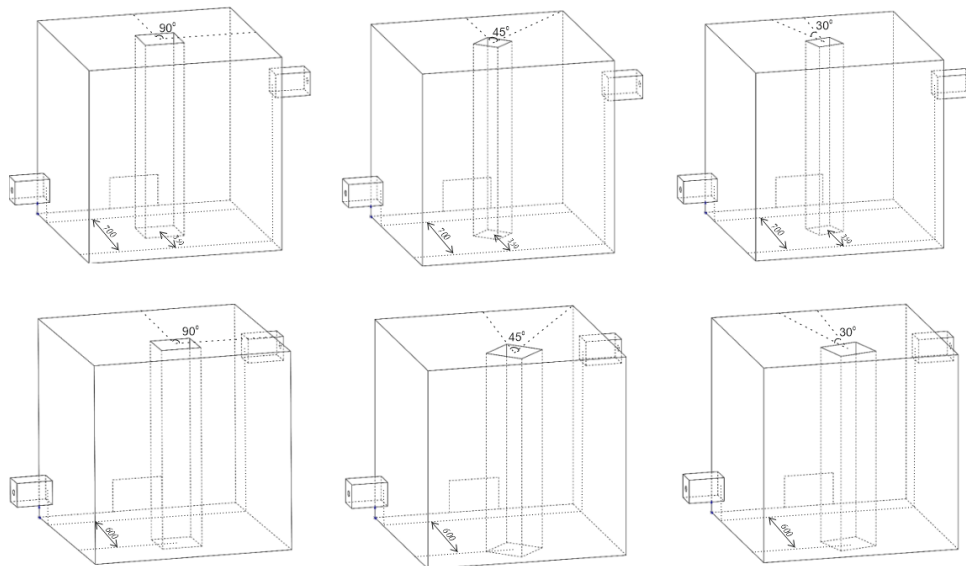


Рисунок 2 – CAD-моделі камери вогневої печі та фрагменту залізобетонної колони для проведення розрахунку

Під час наступного етапу роботи моделі було імпортовано у програмний комплекс CFD. Для відтворення процесу тепломасообміну у вогневій печі застосовані математичні методи, засновані на використанні систем диференціальних рівнянь на основі неперервних середовищ типу Нав'є-Стокса, рівнянь

теплопровідності, в умовах нагрівання під час пожежі та рівняння теплопровідності Фур'є.

Одним з ключових моментів створення комп'ютерної моделі камери вогневої печі є накладення комірок для розрахунку. Це відображено на рис. 3.

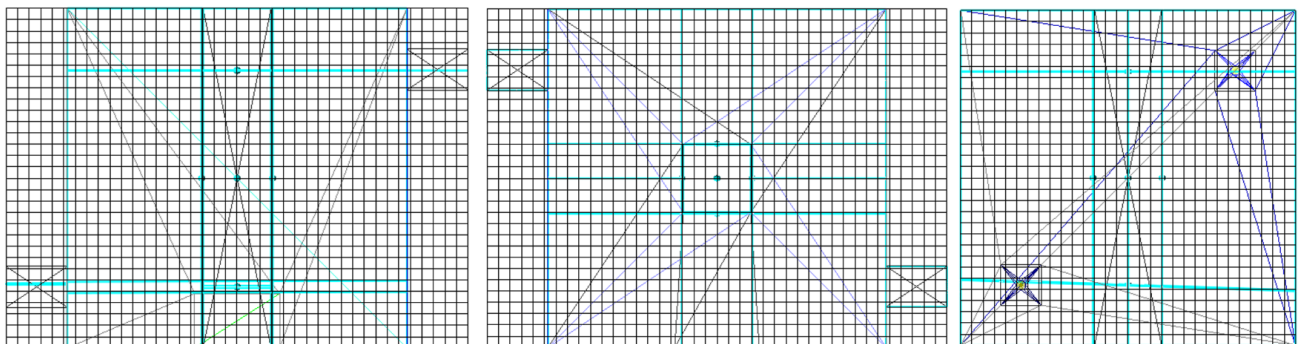


Рисунок 3 – Вигляд імпортованої у CFD-програмний комплекс камери вогневої печі з накладеною сіткою.

У комп'ютерній моделі камери вогневої печі створено розрахункову сітку.

Розмір комірок визначено із принципу розумної достатності, тобто обрано баланс

між достатньою точністю і продуктивністю. Для цього більш «густу» розрахункову сітку створено у регіонах пальників та сполучення камери з фрагментом конструкції, що дозволило врахувати особливості інтенсивних турбулентних потоків у місцях горіння, а також теплообмін поблизу поверхні твердого тіла (рис. 3).

З метою візуалізації процесу розрахунку та отриманих результатів було створено заливку кольорів усередині

камери печі та на поверхні конструкцій. Загальний вигляд початку розрахунку представлено на рис. 4.

Під час моделювання температурний режим пожежі відповідав стандартному [1]. З цією метою, у процесі розрахунку коригувалася інтенсивність подачі горючої речовини.

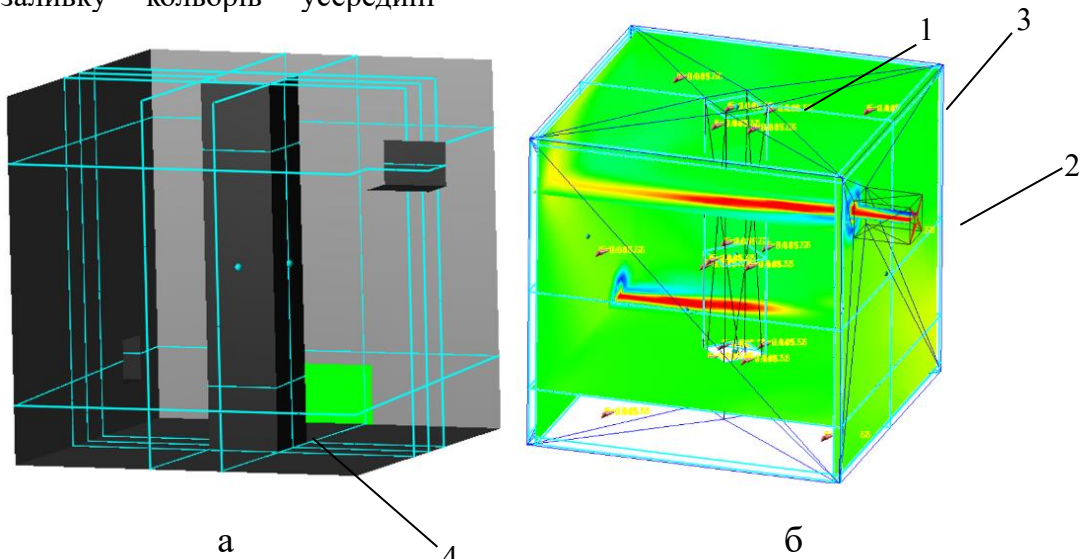


Рисунок 4 – Візуалізація процесу розрахунку: а – загальний вигляд встановленої колони та основних елементів камери печі; б – візуальне відображення процесу моделювання полум'яного горіння всередині камери: 1 – модель фрагменту колони; 2 – візуальне відображення пальників; 3 – візуальне відображення місць; 4 – візуальне відображення отвору для відведення продуктів горіння.

Виклад основного матеріалу.

Відповідно до проведеного дослідження

відбувався контроль температури у камері печі (рис. 4-б), дані представлені на рис. 5 у вигляді графіків.

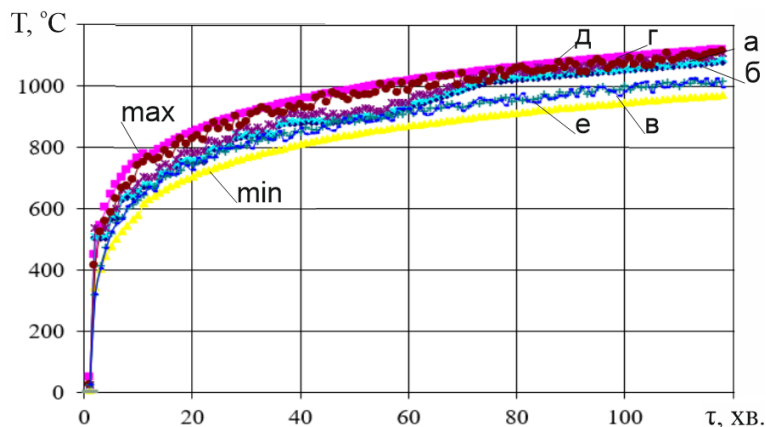


Рисунок 5 – Температурний режим у камері печі під час моделювання: в, н – верхня та нижня межі стан; а, б, в, г, д, е – середня температура у камери печі відповідних моделей (див. рис. 2).

Відповідно до отриманих даних (рис. 5), під час моделювання середня температура у камерах вогневих печей знаходилась у межах стандартного температурного режиму пожежі.

Наступний етап це аналіз дисперсії температур на поверхнях колон під час

їхнього нагрівання.

На рис. 6 заливкою кольорів (градієнт температур) відображено розподіл температур на поверхні фрагменту сталезалізобетонної плити з гофрованим профілем у різні моменти часу нагрівання.

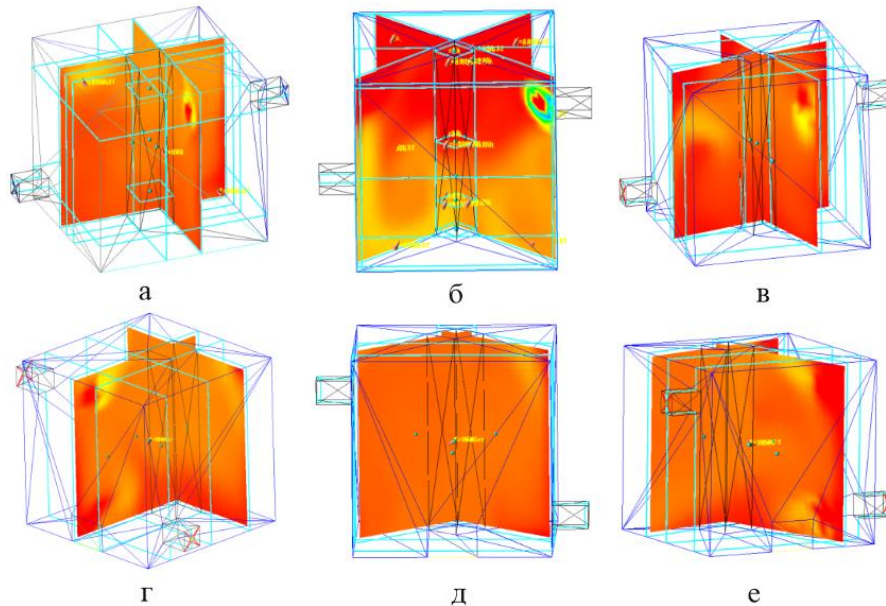


Рисунок 6 – Градієнт температур на обігрівальній поверхні фрагменту залізобетонної колони у різні моменти часу нагрівання: а, б, в, г, д, е – умовне моделі (див. рис. 2).

На рис. 6 візуально можливо спостерігати, що на момент завершення розрахунку (120 хв.) дисперсії температур по обігрівальній поверхні є незначними. Тому, щоб оцінити залежність рівномірності розподілу температури від орієнтації та місця розташування фрагменту, доцільно розглянути їхнє значення протягом усього часу нагрівання. Дисперсія температур на поверхні фрагменту колони була розрахована за наведеною формулою [4, 10]:

$$S_i^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}{n} \quad (1),$$

де n – кількість осередків значень температури, T_i – значення температури осередку, $\bar{T}$ – середнє значення температури на поверхні конструкції.

На рис. 7 відображено значення дисперсії температур на обігрівальних поверхнях фрагментів колони на кожній хвилині протягом часу нагрівання.

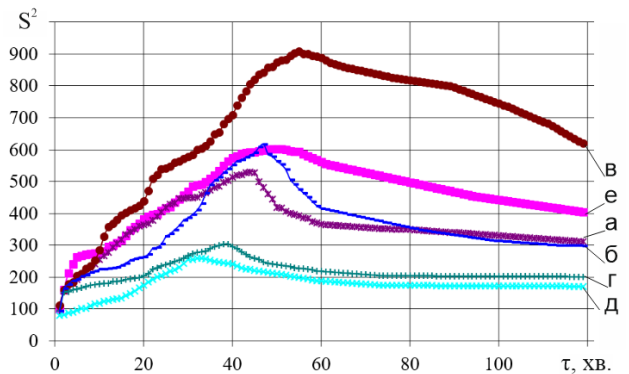


Рисунок 7 – Дисперсії температур на обігрівальних поверхнях фрагментів колони протягом часу нагрівання: а, б, в, г, д, е – умовне моделі (див. рис. 2)

Відповідно до отриманих даних (рис. 7) стало можливим констатувати наступне:

– максимальна дисперсія температур (висока нерівномірність нагріву): модель «в» (кут повороту – 30°). Найвища дисперсія (понад 900), з піком приблизно на 55 хв.

Вказує на те, що колона в такій конфігурації найбільш нерівномірно нагрівається. Це може бути викликано нерівномірністю конвективних теплових потоків з боків.

– найнижча у дисперсія у моделях «д» та «г»: (приблизно 250 та 300 у максимумі), і тримається майже стабільно після піку.

– модель «г» (кут повороту – 90°, розміщення не по центру печі) демонструє найрівномірніше нагрівання. Модель «д» близька до моделі «г», але з більшим кутом (кут повороту – 45°, розміщення не по центру печі), має дещо вищу дисперсію.

у моделей «а», «б», «е» Помірна дисперсія (300–400). Спостерігається швидкий ріст у перші 40 хв, після чого поступове зниження.

Висновки та напрями подальших досліджень. У роботі досліджено вплив розміщення залізобетонної колони в малогабаритній вогневій печі на рівномірність нагрівання її поверхні. Було створено шість конфігурацій моделей із різним кутом повороту та положенням фрагмента конструкції. На основі проведеного CFD-моделювання отримано наступні результати:

1. Математичний апарат програмного комплексу, що застосовує рівняння Нав'є-Стокса, теплопровідності Фур'є та моделі турбулентного горіння,

забезпечує необхідну точність моделювання теплового впливу пожежі в малогабаритній вогневій печі та дає змогу ефективно аналізувати рівномірність прогрівання поверхонь будівельних конструкцій. Температурний режим у камері печі для всіх моделей відповідав вимогам стандартного температурного режиму пожежі згідно з ДСТУ EN 1363-1:2023.

2. Максимальна дисперсія температур, яка свідчить про високу нерівномірність нагрівання, зафіксована у моделі «в» (кут повороту 30°) понад 900 з піком на 55-й хвилині нагрівання. Така нерівномірність зумовлена нерівномірністю конвективних теплових потоків з боків.

3. Найнижчу дисперсію температур (250–300) спостережено в моделі «г» (кут 90°, зміщення не по центру). Це вказує на найвищу рівномірність нагрівання, що робить дане розміщення фрагменту колони найбільш доцільним для проведення експериментальних випробувань у малогабаритній вогневій установці.

4. Перспективою подальших досліджень є використання результатів моделювання для удосконалення експериментально-розрахункового методу оцінювання вогнестійкості залізобетонних колон з використанням малогабаритних вогневих печей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Випробування на вогнестійкість. Частина 1. Загальні вимоги (EN 1363-1:2020, IDT) : ДСТУ EN 1363-1:2023. [Чинний від 2023-12-31]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2023. 54 с. (Національний стандарт України).
2. Випробування несучих будівельних конструкцій на вогнестійкість. Частина 4. Колони (EN 1365-4:1999, IDT) : ДСТУ EN 1365-4:2023. [Чинний від 2023-12-31]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2023. 11 с. (Національний стандарт України).
3. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги : ДБН В.1.1-7:2016. [Чинний від 2017-06-01]. Київ : Мінрегіон України, 2016. 37 с. (Державні будівельні норми України).
4. Нуязін О. М. Розвиток наукових основ оцінювання вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій з використанням малогабаритних модульних вогневих печей : дис. ... д-ра техн. наук : 21.06.02 / Нуязін Олександр Михайлович ; Львів. держ. ун-т безпеки життєдіяльності. Львів, 2023. 418 с.
5. Гарькава О. В., Гасенко А. В. Визначення міцності залізобетонних колон при косому стиску. *Наука та будівництво*. 2017. № 4. С. 29–35.
6. Study of the thermal effect of fire on fragments of reinforced concrete columns based on the results of experimental tests / O. Nuianzin et al. *Strength of Materials and Theory of Structures*. 2024. № 112. С. 202–208.
7. Перегін А. В., Нуязін О. М. Етапи створення прототипу вогневої установки для визначення температурних розподілів малогабаритних фрагментів залізобетонних конструкцій. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідування* : зб. наук. праць. Черкаси : ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2021. Т. 5, № 2. С. 75–82.
8. Оцінка вогнестійкості залізобетонних колон уточненими розрахунковими методами / Є. Дмитренко та ін. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. 2021. № 8. С. 82–96.
9. Поздєєв С. В., Словінський В. К., Щіпець С. Д. Експериментально-розрахунковий метод оцінки вогнестійкості залізобетонних колон на основі їх вогневих випробувань. *Пожежна безпека: теорія і практика*. 2013. № 14. С. 88–93.
10. Поздєєв С. В., Некора О. В., Поздєєв А. В. Методика визначення режимів нагрівання бетонних зразків, що моделюють стан елементів будівельних конструкцій під час пожежі. *Проблеми пожежної безпеки*. Харків : АГЗУ, 2006. Вип. 19. С. 111–116.

REFERENCES

1. DSTU EN 1363-1:2023. (2023). *Vyprobuvannia na vohnestiikist. Chastyna 1. Zahalni vymohy (EN 1363-1:2020, IDT)* [Fire resistance tests. Part 1. General requirements]. DP «UkrNDNTS».
2. DSTU EN 1365-4:2023. (2023). *Vyprobuvannia nesuchykh budivelnnykh konstrukttsii na vohnestiikist. Chastyna 4. Kolony (EN 1365-4:1999, IDT)* [Fire resistance tests for loadbearing elements. Part 4. Columns]. DP «UkrNDNTS».
3. DBN V.1.1-7:2016. (2016). *Pozhezhna bezpeka ob'ektiv budivnytstva. Zahalni vymohy* [Fire safety of construction objects. General requirements]. Minrehion Ukrainy.
4. Nuianzin, O. M. (2023). *Rozvytok naukovykh osnov otsiniuvannia vohnestiikosti zalizobetonnykh budivelnnykh konstrukttsii z vykorystanniam malohabarytnykh modulnykh vohnevykh pechei* [Development of scientific principles for evaluating the fire resistance of reinforced concrete building structures using small-sized modular fire furnaces] (Publication No. 21.06.02) [Doctoral dissertation, Lviv State University of Life Safety]. 418 p.
5. Harkava, O. V., & Hasenko, A. V. (2017). Vyznachennia mitsnosti zalizobetonnykh kolon pry kosomu styisku [Determination of the strength of reinforced concrete columns under eccentric compression]. *Nauka ta budivnytstvo*, (4), 29–35.
6. Nuianzin, O., Kozak, A., Yanishevskiy, V., & Kryshchal, V. (2024). Study of the thermal effect of fire on fragments of reinforced concrete columns based on the results of experimental tests. *Strength of Materials and Theory of Structures*, (112), 202–208. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2024.112.202-208>
7. Perehin, A. V., & Nuianzin, O. M. (2021). Etapy stvorennia prototypu vohnevoi ustanovky dlia vyznachennia temperaturnykh rozpodiliv malohabarytnykh frahmentiv zalizobetonnykh konstrukttsii [Stages of creating a fire rig prototype for determining temperature distributions of small-sized fragments of reinforced concrete structures]. *Nadzvychni situatsii: poperedzhennia ta likviduvannia*, 5(2), 75–82.
8. Dmytrenko, Ye., et al. (2021). Otsinka vohnestiikosti zalizobetonnykh kolon utochnenymy rozrakhunkovymy metodamy [Fire resistance assessment of reinforced concrete columns by refined calculation methods]. *Budivelni konstrukttsii. Teoriia i praktyka*, (8), 82–96. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.8.2021.82-96>
9. Pozdieiev, S. V., Slovinskiy, V. K., & Shchipets, S. D. (2013). Eksperymentalno-rozrakhunkovy metod otsinky vohnestiikosti zalizobetonnykh kolon na osnovi yikh vohnevykh vyprobuvan [Experimental and analytical method for assessing the fire resistance of reinforced concrete columns based on their fire tests]. *Pozhezhna bezpeka: teoriia i praktyka*, (14), 88–93.
10. Pozdieiev, S. V., Nekora, O. V., & Pozdieiev, A. B. (2006). Metodyka vyznachennia rezhymiv nahrivannia betonnykh zprazkiv, shcho modeliuiut stan elementiv budivelnnykh konstrukttsii pid chas pozhezhi [Methodology for determining the heating regimes of concrete specimens modeling the state of building structure elements during a fire]. *Problemy pozheznoi bezpeky*, (19), 111–116.

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE POSITION OF A REINFORCED CONCRETE COLUMN IN A SMALL-SIZED FIRE FURNACE ON THE UNIFORMITY OF ITS SURFACE HEATING

V. Yanishevskiy

National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine

KEYWORDS: ABSTRACT

fire, modeling,
reinforced
concrete,
column,
uniformity,
furnace,
structure, fire
resistance,
testing,
temperature

The article presents the results of a study on the influence of the spatial position of a reinforced concrete column fragment in a small-sized fire furnace on the uniformity of its surface heating under the standard fire temperature regime. The aim of the work is to determine the regularities of temperature field distribution over the column surface depending on its rotation angle and distance from the burners, which affect the reliability of assessing the fire resistance of building structures. To achieve this goal, six CAD models with different geometric configurations of the specimen inside the furnace chamber were developed, followed by CFD modeling that took into account the Navier–Stokes and Fourier heat conduction equations. During the modeling, the standard fire temperature regime was reproduced in accordance with the requirements of DSTU EN 1363-1:2023, which was confirmed by the obtained temperature curves inside the furnace.

The results of the study indicate that the configuration of the specimen's placement in the fire furnace has a significant effect on the uniformity of the temperature field distribution over its surface. It was found that certain spatial orientations of the specimen can lead to noticeable non-uniform heating due to the intensity of heat fluxes and their interaction with the surface of the structure. At the same time, other configurations ensure a more stable temperature regime with less pronounced gradients. In general, a symmetrical or central placement of the specimen contributes to more uniform heating, while inclination or displacement relative to the furnace axis increases thermal heterogeneity.

The obtained results are of practical importance for improving the methodology of fire testing in small-scale fire furnaces and increasing the reliability of experimental and computational determination of the fire resistance limit of reinforced concrete structures. The proposed approach makes it possible to optimize the positioning of specimens in the furnace chamber, reduce measurement errors, and improve the reproducibility of experiments in the field of fire safety.

УДК 621.311:355.58 (477)

УДОСКОНАЛЕННЯ ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТІВ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ

DOI: 10.52363/2518-1777-2026-21-5

Босак П. В.^{1*}, ORCID iD 0000-0002-0303-544X

Лаврівський М. З., ORCID iD 0000-0002-8267-1996

Любовецький О. В., ORCID iD 0009-0007-7904-9091

Босак Г. С., ORCID iD 0009-0002-5648-2486

Воробець В. А., ORCID iD 0009-0008-3018-7386

*E-mail: p.bosak@ldubgd.edu.ua

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна

ІНФОРМАЦІЯ СТАТТЮ	ПРО АНОТАЦІЯ
<i>Надійшла до редакції:</i> 10.02.2026 <i>Прийнято:</i> 09.04.2026 <i>Опубліковано:</i> 30.05.2026 КЛЮЧОВІ СЛОВА: об'єкти критичної інфраструктури, цивільний захист, енергетична безпека, воєнний стан, кіберзагроза, пожежна безпека, стійкість.	У статті розглядається важливе питання забезпечення стійкості та захисту енергетичної інфраструктури України в умовах воєнного стану, особливо в умовах повномасштабної військової агресії з боку країни-агресора. Енергетичний сектор визначений як основна ціль ворожих атак, спрямованих на дестабілізацію національної економіки, оборонного потенціалу та соціального забезпечення. У дослідженні надано комплексний аналіз стану безпеки енергетичної системи України, підкреслюючи багатовимірний характер сучасних загроз. До них належать пряме фізичне руйнування за допомогою ракетних і дронів ударів, виникнення масштабних пожеж на маслоснаповненому обладнанні, масштабні кібератаки на системи управління та гібридні методи дестабілізації. Методологія дослідження передбачає комплексний підхід, що поєднує статистичний аналіз динаміки атак, порівняльний аналіз типів загроз та концептуальне моделювання. Автори проаналізували статистичні дані про втрати інфраструктури за період 2022-2025 років. Дослідження виявляє зміну тактики агресора: від націлювання на теплові електростанції у 2022 році до зосередження уваги на мережах розподілу та передачі електроенергії у 2024-2025 роках. Зазначається, що прямі втрати енергетичного сектору досягли критичного рівня, який оцінюється в мільярди доларів, що вимагає негайних стратегічних контрзаходів у сфері цивільного захисту. Ключовим теоретичним внеском статті є розробка та наукове обґрунтування ієрархічної тривірневої моделі управління безпекою, заснованої на принципі «світлофорної індикації». Ця модель дозволяє застосовувати диференційовані протоколи реагування залежно від рівня загрози для оптимізації роботи підрозділів ДСНС України. «Зелений рівень» (нормальний режим) відповідає стану гомеостазу системи, коли загрози відсутні або знаходяться в прийнятних межах, і фокусується на моніторингу. «Жовтий рівень» (режим готовності) ініціюється після отримання перевіреної інформації про потенційну ескалацію (наприклад, кіберзагрози, метеорологічні аномалії або військові маневри). «Червоний рівень» (кризовий режим) вводиться після інциденту для локалізації збитків, ліквідації пожеж, запобігання системному колапсу та забезпечення виживання життєво важливих функцій. У статті аргументовано, що для забезпечення довгострокової стійкості необхідний перехід від вразливої централізованої архітектури радянської епохи до гнучкої децентралізованої мережі. Пропонований комплекс заходів включає будівництво підземних сховищ енергоресурсів, облаштування сучасних систем автоматичного пожежогасіння, розгортання автономних систем електропостачання (мікромереж) та конвергенцію фізичного захисту (інженерні бар'єри, протидронові сітки) з інтегрованою кіберзахистом інформаційних систем. Впровадження цих заходів має на меті мінімізувати час реагування на надзвичайні ситуації та зберегти системи життєзабезпечення цивільного населення під час військових дій.

Постановка проблеми. Критична інфраструктура є основою життєдіяльності будь-якої держави, забезпечуючи стабільне функціонування економіки, оборони, громадської безпеки та інших життєво важливих сфер. В умовах воєнного стану, коли Україна стикається з масштабною агресією, захист цих об'єктів набуває особливого значення. Оскільки противник використовує як фізичні, так і кібернетичні методи атак, необхідно розробити комплексні заходи для підвищення стійкості інфраструктури до загроз. Знищення чи пошкодження об'єктів енергетики, транспорту, зв'язку, водопостачання, фінансової та оборонної систем може спричинити масштабну дестабілізацію, що супроводжується виникненням складних пожеж і техногенних аварій та вимагає негайного впровадження ефективних стратегій захисту [1].

По-перше, існує фізична загроза – прямі ракетні атаки або атаки безпілотників на енергетичні об'єкти, які у 90% випадків призводять до горіння трансформаторної оливи та руйнування систем пожежогасіння [2]. По-друге, стратегічні та системні ризики: підриив довіри громадськості до спроможності держави забезпечувати основні функції, загрозу енергетичної безпеки та, зрештою, негативний вплив на економіку та життя людей. По-третє, під загрозу ставиться системна адаптивність: необхідно не лише відремонтувати пошкоджені об'єкти, але й підвищити їхню стійкість до нових загроз [3]. Таким чином, проблема виникає в неадекватності існуючих заходів захисту енергетичної інфраструктури України в умовах воєнного стану, враховуючи масштаб, характер та динаміку загрози роботи критично важливих енергетичних систем. Існуючі механізми фізичного захисту, координація дій між державними та приватними структурами, а також технологічна та інституційна стійкість не завжди достатні для задоволення потреб воєнного часу. Наприклад, було виявлено, що трирівнева концепція захисту енергетичних об'єктів реалізована лише частково, а алгоритми

взаємодії операторів об'єктів з пожежно-рятувальними підрозділами не враховують тактику «подвійних ударів» агресора.

Питання захисту об'єктів критичної інфраструктури та їх нормативно-правового регулювання стали важливими через посилення загроз ззовні, зокрема природних і техногенних катастроф, терористичних актів, військових конфліктів та кібератак, на які піддаються ці об'єкти. Україна не є винятком серед інших країн, тому наявність таких загроз робить дослідження у сфері захисту критичної інфраструктури особливо актуальним. Ці об'єкти є важливими для стабільного функціонування суспільства та держави в цілому. Від 24 лютого 2022 року, коли країна-агресор розпочала повномасштабне вторгнення в Україну і продовжує намагатися знищити об'єкти критичної інфраструктури, питання їх захисту стали ще більш важливими [4].

У сучасних збройних конфліктах об'єкти критичної інфраструктури, які забезпечують життєво важливі послуги для цивільного населення, систематично піддаються атакам, випадковим пошкодженням та неправомірному використанню агресором (рис. 1). Такі дії провокують значні перебої у функціонуванні цих систем, що має серйозні та багатовимірні наслідки. Від негайних криз, як-от масове переміщення населення, кризи з продовольством та енергопостачанням, до довготривалих наслідків, таких як нестача засобів до існування та поширення інфекційних захворювань, наслідки таких руйнувань виходять далеко за межі однієї держави [5, 6].

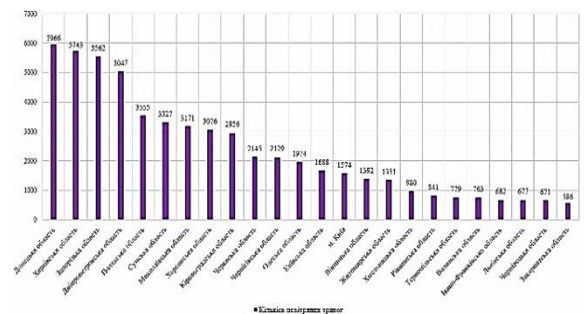


Рисунок 1 – Статистика повітряних тривог в Україні від 24 лютого 2022 року (станом на 1 січня 2026 року) [7]

Військова інтервенція завдає шкоди цивільному населенню як безпосередньо, через поранення та загибелі від збройного насилля, так і опосередковано, наприклад, у результаті руйнування або недоступності базових послуг. До таких послуг належать системи електропостачання, охорони здоров'я, водопостачання, обробки та розподілу продуктів харчування, каналізаційної інфраструктури, а також освіти. Безперебійне функціонування цих систем є життєво необхідним для забезпечення базових потреб цивільного населення.

Для кращого розуміння й захисту цивільного населення у контексті військової агресії необхідно чітко визначити поняття «життєво необхідних послуг». Ці послуги охоплюють комплекс із трьох ключових компонентів: матеріально-технічні засоби (інфраструктура, обладнання тощо), людські ресурси (оператори та обслуговуючий персонал), а також витратні матеріали (наприклад, паливо чи лікарські засоби). Усі елементи, що забезпечують безперебійну роботу системи послуг, називають критично важливими. Попри різноманітність форм негативного впливу на ці послуги, головною причиною їх порушення залишається пошкодження або руйнування об'єктів критичної інфраструктури під час військових дій. Ці ушкодження можуть мати як умисний характер – наприклад, прицільні атаки на об'єкти інфраструктури однією зі сторін конфлікту, так і випадковий, коли важке озброєння із широкою зоною ураження використовується поблизу таких об'єктів. Окрім цього, часто об'єкти критичної інфраструктури використовуються неправомірно у своїх військових стратегіях, блокуючи доступ до базових послуг для цивільного населення з метою посилення тиску на Україну (наприклад військове захоплення Запорізької АЕС).

Енергетична система України зазнала безпрецедентної деградації внаслідок комбінованих ударів (рис. 2). Якщо у 2022 році основний збиток було завдано тепловій генерації (уражено кілька блоків

ТЕС), то у 2024-2025 роках вектор атак змістився на об'єкти розподілу та передачі електроенергії. Прямі збитки ТЕС та ТЕЦ оцінюються у 2,5 млрд та 320 млн доларів відповідно, що становить критичну частку від загальних втрат енергосектору (7,4 млрд доларів) [8].

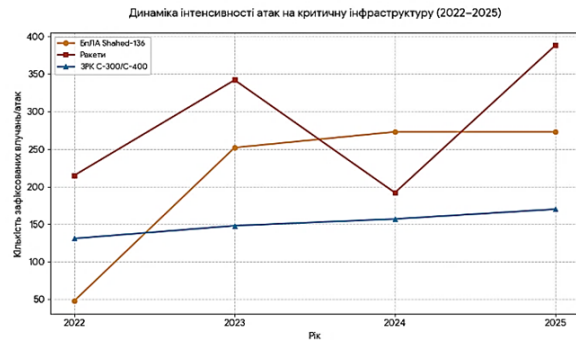


Рисунок 2 – Динаміка інтенсивності атак на критичну інфраструктуру 2022-2025 рр. [9]

Рисунок демонструє чітку тенденцію переходу ворога від ракетного терору до стратегії виснаження за допомогою БпЛА. Видно, що інтенсивність ударів по критичній інфраструктурі у 2025 році (понад 830 атак сумарно) перевищує показники попередніх років.

Додатково слід зазначити, що Міжнародне гуманітарне право забороняє використання голоду як зброї війни. Це пряма заборона нападів на об'єкти, що необхідні для життєзабезпечення цивільного населення. До таких об'єктів належать запаси продуктів харчування, сільськогосподарські угіддя, пасовища з худобою, водозабірні споруди та ін. Заборони також охоплюють енергетичну інфраструктуру, яка суттєво впливає на функціонування інших критично важливих систем. Весь цей комплекс норм спрямований на мінімізацію шкоди для цивільного населення та збереження його основних засобів існування навіть у найскладніших умовах війни.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У вітчизняних та закордонних наукових працях розглядаються різні методи до забезпечення охорони об'єктів критичної інфраструктури.

Українські науковці зосереджують увагу на особливостях захисту важливих

об'єктів, аналіз впливу воєнних загроз на інфраструктуру, а також питання організаційного забезпечення безпеки [10-13]. Західні науковці приділяють значну увагу адаптації об'єктів до гібридних загроз, використанню розумних систем моніторингу та співпраці державного й приватного сектору у сфері безпеки [14].

Аналіз останніх досліджень та публікацій свідчить про те, що наукова думка у сфері захисту об'єктів критичної інфраструктури України трансформувалася від вивчення теоретичних засад безпеки до розробки прикладних механізмів гібридної стійкості. Сучасні дослідження підкреслюють, що характер загроз для об'єктів критичної інфраструктури має комплексний та гібридний вимір, що вимагає оновлення нормативної бази. Наукова праця [15] наголошує на проблемах та перспективах впровадження системного захисту об'єктів критичної інфраструктури в Україні, розглядаючи їх як фундамент національної безпеки. Наукові статті [16-17] аналізують організаційно-нормативні перепони, пропонуючи перехід до превентивного управління ризиками замість реактивного відновлення. Науковці [18], акцентують увагу на важливості підготовки фахових кадрів, здатних оперувати системами захисту в умовах екстремальних навантажень воєнного стану.

Також вчені [19] досліджують зарубіжний досвід, вказуючи на необхідність адаптації кращих практик НАТО щодо будівництва заглиблених (підземних) пунктів керування та енергетичних сховищ. Також науковці [20] проводять інформаційний аналіз систем захисту, обґрунтовуючи доцільність впровадження багаторівневих інженерних споруд (габіонів, антидронових сіток, тощо).

Аналіз літературних джерел показує, що найбільш актуальним завданням сучасної науки є конвергенція фізичного та кібернетичного захисту. Україна демонструє унікальний досвід оперативної адаптації енергосистеми, що стає об'єктом прискіпливого вивчення західними

фахівцями. Водночас, в умовах війни треба поєднувати ці методи і вдосконалювати або створювати нові методи та розробляти національні стратегії, що беруть до уваги специфіку реалій війни.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою цієї статті є аналіз сучасного стану захисту об'єктів енергетичної інфраструктури України в умовах воєнного стану (зокрема в розрізі пожежної безпеки та цивільного захисту) та розробка ефективних заходів її удосконалення.

Методи досліджень. У процесі підготовки наукової статті використано комплексний методологічний апарат, що відповідає сучасним вимогам до досліджень у сфері цивільного захисту. Застосовано метод системного аналізу для оцінки поточного стану енергетичної та пожежної безпеки; статистичний метод для обробки та візуалізації емпіричних даних щодо інтенсивності атак (за період 2022-2025 рр.); концептуальне моделювання для розробки ієрархічної трирівневої моделі управління безпекою, а також метод структурно-функціонального аналізу для доведення необхідності превентивної взаємодії операторів інфраструктури з підрозділами ДСНС України. Отримані результати аргументовано за допомогою дедуктивного методу, де від загальної статистики уражень виведено конкретні вимоги до протоколів безпеки.

Завдання дослідження – оцінити та проаналізувати забезпечення безпеки та стійкості об'єктів енергетичної інфраструктури та визначити ефективні заходи щодо їх удосконалення.

Виклад основного матеріалу. В умовах збройного конфлікту критична інфраструктура стає однією з головних цілей атак, оскільки її руйнування може суттєво послабити економічний та оборонний потенціал держави, спричинити гуманітарну кризу та погіршити моральний стан населення.

Основними загрозами для критичної інфраструктури в умовах воєнних дій є: фізичні атаки, зокрема ракетні удари, авіаційні бомбардування, артилерійські

обстріли стратегічних об'єктів; кібернетичні загрози, які включають атаки на урядові установи, фінансовий сектор, телекомунікаційні компанії, підприємства енергетики та транспорту; гібридні методи дестабілізації, до яких належать інформаційні операції, диверсійні дії, економічні санкції, а також використання агентів впливу для поширення паніки та хаосу серед населення.

Однією з найсерйозніших загроз для критичної інфраструктури є ракетні удари та авіаційні бомбардування, які можуть знищити енергетичні об'єкти, транспортні вузли, комунікаційні центри, військові бази та промислові підприємства. Наприклад, атаки на електростанції можуть спричинити масштабні перебої в електропостачанні, що негативно вплине на роботу лікарень, підприємств харчової промисловості, систем водопостачання та опалення, тощо.

При оцінці втрат у галузі електроенергії використовувались прямі та непрямі засоби для обчислення витрат на втрачені та пошкоджені об'єкти. Вартість пошкоджених суб'єктів визначається на основі первинного транспортування основних активів, вартість ремонту, вартість відновлення, тощо.

Основні дані про втрати енергії, надані Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України та Міністерством енергетики України. Особистий підхід, який використовується для оцінки втрат у надані відповідно до інформації з відкритих джерел, власників та лідерів бізнесу, центральних організацій управління. Збір даних про втрату енергетичних об'єктів здійснювався обома загальними джерелами через ризик високого розповсюдження інформації детального пошкодження важливої інфраструктури внаслідок військової агресії рф.

Поточна оцінка дуже складна через відсутність детальної інформації. З жовтня 2022 року по лютий 2023 року військові рф здійснювали наймасованіші ракетні атаки на об'єкти, що забезпечують виробництво, передачу та розповсюдження

електроенергії (рис. 3).

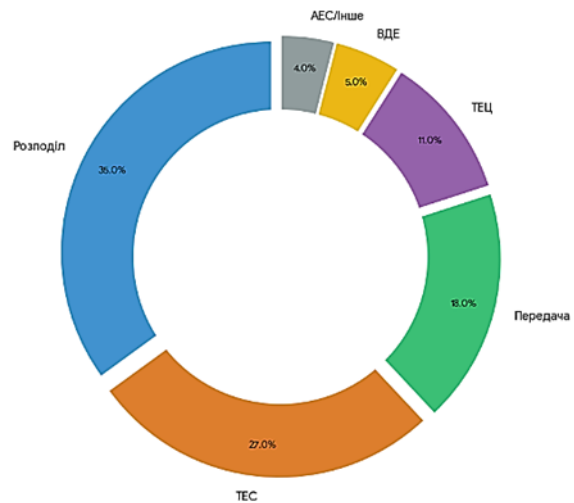


Рисунок 3 – Прямі інфраструктурні збитки об'єктам електроенергетики

Значні збитки припадають на великі об'єкти генерації електрики. В результаті одного з масованих обстрілів під час опалювально-зимового періоду 2022-2023 років, за словами Прем'єр-міністра України, було пошкоджено 9 блоків теплових електростанцій, причому щонайменше один з них був повністю знищений в наслідок прямого влучення. Загалом, оцінюються поточні прямі збитки теплової електрогенерації на рівні 2,5 млрд доларів для ТЕС та 320 млн доларів для ТЕЦ.

Окремою загрозою, яка прямо корелює з фізичними атаками, є критичне пожежне навантаження. Знищення трансформаторів супроводжується вибоком 100 тис. т горючої рідини, що створює екстремальні умови для роботи пожежно-рятувальних підрозділів.

Дороги, мости, залізничні вузли та порти є ключовими елементами транспортної інфраструктури, які забезпечують логістичні операції, військові перевезення та гуманітарні місії. Їх руйнування значно ускладнює пересування військових сил, постачання продовольства, медикаментів та пального.

Наприклад, воєнний злочин та потенційно акт екоциду рф – підриг Каховської ГЕС у 2023 році спричинив масштабну екологічну та гуманітарну

катастрофу, підтоплення населених пунктів і загибель людей [21].

Окрім фізичних нападів, критична інфраструктура зазнає кібернетичних загроз. Ці атаки здатні вивести з ладу державні реєстри, фінансові системи, мережі енергопостачання та телекомунікаційні вузли. Злом інформаційних баз державних установ може спричинити витік конфіденційних відомостей, що послаблює обороноздатність держави.

Наприклад, у 2017 році кібератака вразила українські державні структури, банки та аеропорти, паралізувавши їхню діяльність. Атаки на системи керування енергомережами можуть спричинити аварійні вимкнення електроенергії. Так, у 2015 році хакерська атака на українські енергокомпанії залишила без світла понад 200 тисяч осіб. Гібридна війна поєднує фізичні та кібернетичні атаки з інформаційними маніпуляціями, економічним тиском та використанням агентів впливу.

З 2014 року на сході України розпочалася антитерористична операція, яка в 2022 році переросла у повномасштабну війну. Внаслідок цього частина областей опинилася під окупацією. Деякі території вдалося звільнити, проте значна частина залишається під контролем агресора. Водночас щоденні обстріли охоплюють всю країну, використовуючи різні види озброєння: ракети, безпілотники, авіабомби, балістичні ракети тощо. Це спричиняє не лише матеріальні, екологічні та фінансові втрати, а й головну трагедію війни – загибель мирного населення, навіть у віддалених від фронту містах. Обстріли завдають ударів по житлових будинках, школах, лікарнях, підприємствах та критично важливих об'єктах інфраструктури.

У 2022 році ворог здійснив численні обстріли критичної інфраструктури та енергетичних об'єктів України, що призвело до масштабних пожеж, руйнувань і серйозних проблем в енергосистемі країни. Крім того, з 10 жовтня 2022 року почалися регулярні удари по об'єктам

енергетики із застосуванням крилатих ракет (Х-101, «Калібр»), що спричинило масове відключення світла та ускладнення в роботі критичної інфраструктури. За весь 2022 рік було зафіксовано 11 масованих ракетних атак на енергосистему, в ході яких було випущено понад 1400 ракет різних типів.

Загалом у 2022 році було знищено або пошкоджено понад 700 життєво важливих споруд, серед яких аеропорти, мости, нафтобази, трансформаторні підстанції та електростанції та ін. Найбільше руйнувань відзначили такі області, як Дніпропетровська, Львівська, Вінницька, Запорізька, Івано-Франківська, Київська та Харківська. Унаслідок цих обстрілів енергосистема втратила значну частину потужностей. Мета цих атак – виведення з ладу енергетичної системи і психологічний хаос населення України, що послаблює обороноздатність України та її волю до захисту. На рис. 4 зображено обстріли енергетичної інфраструктури України у 2022 році.



Рисунок 4 – Обстріли енергетичної інфраструктури України у 2022 році

У 2023 році РФ продовжувала масовані обстріли критичної інфраструктури, зокрема енергетичних об'єктів України, завдаючи багатьох руйнувань та масштабних втрат енергосистеми. За підрахунками, у перші місяці 2023 року за період з жовтня 2022-го до лютого 2023 року було понад 220 ударів по 110 об'єктах критичної та цивільної інфраструктури.

У лютому 2023 року відбулися численні масовані ракетні атаки, зокрема 67 запусків крилатих ракет по об'єктам

критичної інфраструктури, що спричинило одночасні масштабні відключення світу вперше в історії. Також окупаційні війська РФ почали застосовувати комбінаційні атаки, а саме додатково застосовуючи балістичні ракети, ракети Х-22, Х-47 «Кинджал», а також ударні БПЛА типу Shahed-136/131.

Особливо потужні атаки були наприкінці 2023 року. У листопаді станції «Зміївська» та «Трипільська» теплоелектростанції (ТЕС) «Центренерго» знову були знищені російськими ударами, що призвело до повної зупинки генерації в Харківській та Київській області. Внаслідок цього «Укренерго» було вимушено запровадити аварійні та погодні графіки відключення електропостачання по всій країні. Застосовувалась велика кількість ракет і безліч дронів, які одночасно атакували відновлені після попередніх ударів по об'єктах електроенергії. За підсумками 2023 року прямі збитки енергетичного сектору України сягнули понад 16 млрд доларів. Найбільше постраждали об'єкти генерації електроенергії (8,5 млрд), магістральні лінії передачі (2,1 млрд) та нафтогазової інфраструктури (3,3 млрд). Загальні втрати включають також втрачений дохід від роботи енергетичних компаній, оцінений у понад 39 млрд доларів.

Отже, 2023 рік (рис. 5) характеризувався продовженням інтенсивних і системних атак на критичну інфраструктуру та енергетичні об'єкти, що викликало масштабні руйнування, складності з електропостачанням в Україні та величезні економічні втрати.



Рисунок 5 – Обстріли енергетичної інфраструктури України у 2023 році

У 2024 році обстріли критичної інфраструктури і енергетичних об'єктів України залишилися системними та надзвичайно інтенсивними. З 21 березня 2024 року агресор почав нові масовані удари по енергетичних об'єктах, які тривали протягом року. Серед пошкоджених об'єктів були підземне газове сховище, а також численні теплові електростанції (ТЕС) і гідроелектростанції (ГЕС) у різних регіонах України.

Протягом 2024 року було понад 1100 запусків ракет, зокрема 17 днів інтенсивних обстрілів із понад 80 ракетами за добу. Ворог активно застосовував ракети різного типу, зокрема з комплексів С-300, а також ударні безпілотики. Через ці дії понад 40% генеруючих потужностей енергосистеми було пошкоджено чи знищено.

Наприкінці 2024 року, агресор завдав масованого комбінованого ракетно-дронового удару по паливно-енергетичному сектору із застосуванням ракет різних типів та ударних безпілотики, що спричинило значні пошкодження та масштабні відключення електропостачання у багатьох випадках (рис. 6). Обстріли призвели до масштабних пожеж, руйнувань інфраструктури, відключень електрики, перебоїв із комунальними послугами та роботи транспорту. Зусилля українських сил ППО дозволили збивати значну частину ракети, але значні втрати в енергетиці та критичній інфраструктурі мали місце. Були пошкоджені об'єкти у Львівській, Київській, Харківській, Дніпропетровській, Запорізькій, Вінницькій та інших областях.

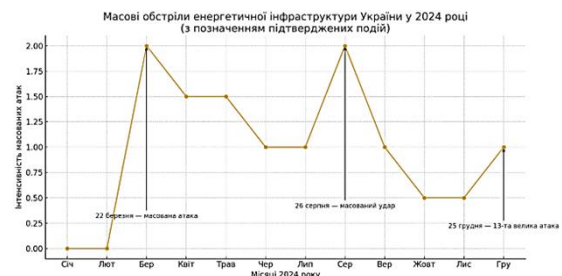


Рисунок 6 – Обстріли енергетичної інфраструктури України у 2024 році

У 2025 році обстріли критичної інфраструктури та енергетичних об'єктів

України залишилися масштабними та системними. Внаслідок цієї атаки пошкоджено чи знищено чисельність енергетичних об'єктів у Київській, Харківській, Одеській, Запорізькій, Кіровоградській, Сумській. У жовтні 2025 року під удари потрапили три важливі енергооб'єкти в Чернігівській області, що призвело до масштабних перебоїв із електропостачанням і газопостачанням в регіоні (рис. 7). Для відновлення пошкодженої інфраструктури Україна співпрацює з міжнародними партнерами, для залучення фінансової допомоги на відновлення енергетичних об'єктів і закупівлю палива. Попри серйозні удари, Збройні сили та ППО України з підтримки міжнародних партнерів продовжують оборону та роботу з відновлення енергосистем.

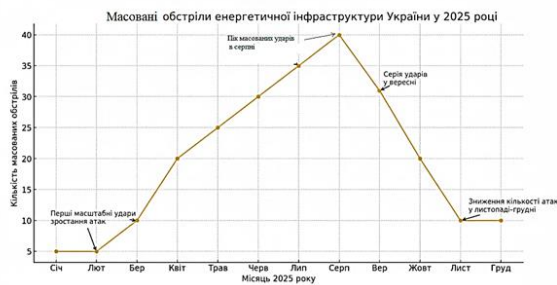


Рисунок 7 – Обстріли енергетичної інфраструктури України у 2025 році

Відповідно до статистики за період повномасштабного вторгнення, ворог завдав щонайменше понад 400 ударів по військових об'єктах, понад 3600 – по цивільних, а також уразив не менше 3000 по об'єктам критичної інфраструктури.

Для дієвого захисту варто впроваджувати комплексний метод. Цей підхід обґрунтовується неможливістю гарантувати 100% перехоплення засобів повітряного нападу. Значущі кроки для забезпечення стабільного захисту: посилення міцності інфраструктурних об'єктів та модернізація систем автоматичного пожежогасіння; формування підземних резервуарів для енергоносіїв; використання портативних генераторів.

Лише за умови злагоджених зусиль у цих площинах можливо зменшити

небезпеки і гарантувати стійкість держави перед поточними проблемами, зокрема за умов військових дій, технічних нападів та стихійних лих.

Посилення безпеки об'єктів енергетики є невіддільною складовою загальної доктрини державності. На нашу думку є декілька значущих кроків для забезпечення стабільного захисту: посилення міцності інфраструктурних об'єктів: життєво важливі об'єкти, енергетичні установи, мережі водопостачання, летовища, медичні заклади та інші стратегічно важливі споруди, мають бути оснащені новітніми охоронними та захисними комплексами. Це включає не лише фізичні перепони, але й упровадження передових методів моніторингу, зокрема відеоспостереження, систем контролю входу, а також механізмів раннього оповіщення про небезпеки; формування підземних резервуарів для енергоносіїв: збереження енергетичних запасів є життєво необхідним для забезпечення сталої діяльності держави в умовах надзвичайних ситуацій.

Сучасні кіберзагрози можуть завдавати більш значної шкоди, ніж традиційні військові дії, тому не слід забувати, що впровадження сучасних заходів кіберзахисту на енергетичних об'єктах і в критичній інфраструктурі є ключовим елементом національної безпеки. Всі ключові інформаційні системи енергетичних підприємств та критичної інфраструктури мають бути захищені сучасними методами шифрування, що гарантують конфіденційність даних навіть у разі несанкціонованого доступу, а також необхідно впроваджувати системи моніторингу, які своєчасно виявляють і блокують кібератаки, запобігаючи їхньому негативному впливу на інфраструктуру та інформаційні ресурси.

Для забезпечення живучості енергосистеми аргументується необхідність впровадження чіткої ієрархії режимів функціонування [22-23]. Концептуальну модель системи «світлофорної індикації» представлено на рис. 8.



Рисунок 8 – Ієрархія режимів функціонування об'єктів критичної інфраструктури за принципом «світлофornoї індикації»

Штатний режим характеризується станом гомеостазу системи, коли зовнішні та внутрішні загрози відсутні або знаходяться в межах допустимих значень (здійснення моніторингу та підтримання системної стійкості).

Режим готовності до надзвичайної ситуації ініціюється отриманням верифікованих розвідданих або прогнозних показників, що свідчать про ймовірну ескалацію небезпеки: кіберзагрози, тероризм, військовими діями, метеорологічні аномалії, тощо. Максимізація захисного потенціалу та підготовка ресурсів до потенційного переходу в активну фазу кризи.

Режим кризової ситуації передбачає стан системи після фактичної реалізації загрози (інциденту), що призвела до деструктивного впливу на життєво важливі функції та життєзабезпечення населення (локалізація наслідків, відновлення функціональності та запобігання системному колапсу).

Наукова аргументація цієї моделі полягає в тому, що аналіз наведених статистичних втрат доводить повну неспроможність традиційної системи реагування. Запропонована модель створює алгоритм превентивної дії. Штатний режим – гомеостаз, режим готовності до надзвичайної ситуації – ініціюється розвідданими, режим кризової ситуації – інцидент відбувся (локалізація, гасіння пожеж під прикриттям ППО та мобільних

укриттів, відновлення). Така індикація дозволяє оптимізувати людський ресурс ДСНС України і мінімізувати втрати серед особового складу шляхом завчасного приведення у готовність.

На початку 2026 року ми бачимо, що агресор посилює обстріли об'єктів критичної інфраструктури, а саме об'єкти енергетики. Мета лишити населення України без тепла та світла (в результаті зниження температури повітря), порушення життєзабезпечення, залякування населення та міжнародних партнерів, знищення держави України. Національна безпека в енергетичному секторі – це не тільки стратегічне планування, а і реальна готовність до швидких і ефективних дій, а також активна участь у міжнародній співпраці заради захисту демократичних цінностей і стабільності на глобальному рівні.

Висновки та напрями подальших досліджень. Захист об'єктів енергетичної структури в умовах воєнного стану є одним із найважливіших елементів забезпечення національної безпеки та економічної стабільності України. Враховуючи значні виклики, пов'язані з повномасштабною військовою агресією, руйнування чи виведення з ладу об'єктів енергетики може спричинити масштабні збої в енергопостачанні, що безпосередньо впливає на життєздатність інших критичних систем – транспорту, комунікацій, охорони здоров'я та оборони. Посилення фізичної захищеності цих об'єктів, розвиток автономних та резервних джерел живлення, впровадження сучасних технологій моніторингу та кібербезпеки є надзвичайно актуальними завданнями. Важливим також є підвищення рівня організаційної готовності до кризових ситуацій через створення координаційних центрів, проведення навчань та своєчасне оновлення нормативно-правової бази.

За умов чинного воєнного стану в Україні захист енергетичної інфраструктури – життєво важливого компонента національної безпеки та життєво важливого джерела нації став ключовим підсумком. Військова агресія рф,

спрямована на цілеспрямований саботаж об'єктів української енергетичної системи, включаючи лінії електропередачі, підстанції, теплові електростанції та гідроелектростанції, серйозно порушила стабільність електро- та теплопостачання та створила гуманітарні та соціально-економічні ризики (наприклад, зимові перебої з опаленням, відключення критичної інфраструктури).

Пропонування рекомендацій щодо підвищення стійкості енергетичної системи, включаючи диверсифікацію та децентралізацію джерел енергії, модернізацію інфраструктури та інтеграцію з європейською енергетичною мережею. Створення інституційних механізмів координації державних, приватних та

міжнародних суб'єктів для швидкого реагування, відновлення та захисту енергетичних об'єктів. Додатково міжнародна співпраця у сфері безпеки енергетичної інфраструктури сприяє впровадженню передових технологічних рішень і обміну передовим досвідом.

Подальші дослідження мають зосередитися на розробці інноваційних тактик пожежогасіння на об'єктах енергетики під час загрози повторних ракетних ударів.

Тому, питання захисту енергетичної інфраструктури в Україні в умовах воєнного стану є особливим внеском і вимагає системного та наукового підходу, що забезпечує технологічний, організаційний та стратегічний рівні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бєлай С. В., Свтушенко І. В., Мацюк В. В. Теоретико-методологічні засади підготовки кадрів у сфері захисту критичної інфраструктури України. *Вісник національного університету цивільного захисту України. Серія Державне управління*. 2021. № 2(15). С. 342-350. <https://doi.org/10.52363/2414-5866-2021-2-40>.
2. Скіцько О., Ширшов Р. Система управління інформаційною безпекою як інструмент підвищення захисту та ефективності об'єктів критичної інфраструктури. *Міжнародний науковий журнал інженерії та сільського господарства*. 2023. № 2(6). С. 12-22. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20230206.02>.
3. Oleksiuk, V. (2025). Green Energy as a tool for resilience and recovery of Ukraine during the war and in the post-war period. *Modern Economics*, 50(1), 136-143. [https://doi.org/10.31521/modecon.v50\(2025\)-18](https://doi.org/10.31521/modecon.v50(2025)-18).
4. Братель С. Г. Досвід зарубіжних країн у сфері забезпечення безпеки об'єктів критичної інфраструктури. *Південноукраїнський правничий часопис*. 2023. № 3. С. 261-265. <https://doi.org/10.32850/sulj.2023.3.41>.
5. Umantsiv, Y., & Shkurovadska, D. (2023). National resilience of Ukraine under the martial law. *Scientia Fructuosa*, 151(5), 4-19. [https://doi.org/10.31617/1.2023\(151\)01](https://doi.org/10.31617/1.2023(151)01).
6. Мельник Д. С. Побудова моделі загроз національній критичній інфраструктурі України як основа забезпечення її безпеки та стійкості. *Вісник Харківського національного університету внутрішніх справ*. 2024. № 1(104). С. 237-250. <https://doi.org/10.32631/v.2024.1.20>.
7. Статистика повітряних тривог. URL: <https://air-alarms.in.ua/?from=2022-02-24&to=2026-01-01#statistic>.
8. Яременко О. І., Страхніцький Я. О. Теоретико-методичні основи забезпечення системи захисту критичної інфраструктури держави. *Державне управління: удосконалення та розвиток*. 2022. № 1. <https://doi.org/10.32702/2307-2156-2022.1.38>.
9. Havrys, A., Yakovchuk, R., Pekarska, O., & Tur, N. (2024). Use of the computer modelling for the analysis of dangerous areas during flooding of territories. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 25(4), 336-343. <https://doi.org/10.12912/27197050/184265>.
10. Гавриш А. П., Філіппова В. В., Тур Н. Ю. Інформаційний аналіз систем захисту об'єктів критичної інфраструктури в період дії воєнного стану. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2024. № 30. С. 173-187. <https://doi.org/10.32447/20784643.30.2024.17>.
11. Герасименко О. М. Загрози об'єктам критичної інфраструктури України в умовах воєнного стану. *Науковий вісник Ужгородського Національного Університету. Серія Право*. 2024. № 84(3). С. 257-263. <https://doi.org/10.24144/2307-3322.2024.84.3.39>.
12. Гора І. В., Батюк О. В. Окремі питання захисту об'єктів критичної інфраструктури: зарубіжний досвід. *Соціально-правові студії*. 2021. № 1(11). С. 132-139.
13. Кучма О. М., Котух Є. В. Критична інфраструктура та кіберзагрози: досягнення стратегічних цілей державного аудиту щодо кіберзахисту критичної інфраструктури. *Наукові перспективи*. 2023. № 10(40). С. 161-173. [https://doi.org/10.52058/2708-7530-2023-10\(40\)-161-173](https://doi.org/10.52058/2708-7530-2023-10(40)-161-173).
14. Vhpiliarevych, V., Tocicka, J. W., & Szafrńska, K. (2023). Civil protection and protection of critical infrastructure in Ukraine during the conditions of the martial state. *Journal of Security and Sustainability Issues*, 13(1), 265-272. <https://doi.org/10.47459/jssi.2023.13.29>.
15. Бірюков Д. С., Кондратов С. І. Захист критичної інфраструктури: проблеми та перспективи впровадження в Україні: аналітична доповідь. Київ: НІСД, 2012. 96 с.
16. Мурасов Р., Нікітін А., Мещеряков І., Підгородецький М., Поплавець С. Удосконалення науково-методичного апарату для розрахунку ризиків виникнення та аналізу сценаріїв надзвичайних ситуацій на об'єктах критичної інфраструктури. *Соціальний розвиток і безпека*. 2024. № 14(1). С. 205-217. <https://doi.org/10.33445/sds.2024.14.1.17>.

17. Франчук В. І., Пригунов П. Я., Мельник С. І. Безпека об'єктів критичної інфраструктури в Україні: організаційно-нормативні проблеми та підходи. *Соціально-правові студії*. 2021. № 3(13). С. 142-148.
18. Іваницька О. М., Возненко О. М. Управління ризиками об'єктів критичної інфраструктури. *Фінанси України*. 2024. № 6. С. 93-107. <https://doi.org/10.33763/finukr2024.06.093>.
19. Bani-Meqdad, M. A. M., Senyk, P., Udod, M., Pylypenko, T., & Sylkin, O. (2024). Cyber-environment in the human rights system: Modern challenges to protect intellectual property law and ensure sustainable development of the region. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 19(4), 1389-1396. <https://doi.org/10.18280/ijstdp.190416>.
20. Bohun, V. (2024). Assessing the impact of infrastructure damage on national investment attractiveness during martial law. *Pakistan Journal of Life and Social Sciences*, 22(2), 10379-10385. <https://doi.org/10.57239/pjlss-2024-22.2.00784>.
21. Yakovliev, Y., Rogozhin, O., Stefanyshyn, D., Kreta, D., Anpilova, Y., & Myrontsov, M. (2024). Environmental and geological hazards after the explosion of the Kakhovka hydroelectric power plant and rehabilitation options. *Systems, Decision and Control in Energy VI*, 532-537. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67091-6_25.
22. *Ukrainian energy sector evaluation and damage assessment - X*. (2023). Cooperation for Restoring the Ukrainian Energy Infrastructure project. https://www.energycharter.org/fileadmin/DocumentsMedia/Occasional/2023_05_24_UA_sectoral_evaluation_and_damage_assessment_Version_X_final.pdf.
23. Про критичну інфраструктуру: Закон України від 16.11.2021 № 1882-IX: станом на 21 верес. 2024 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20#Text>.

REFERENCES

1. Bielai, S. V., Yevtushenko, I. V., & Matsiuk, V. V. (2021). Theoretical and methodological foundations of personnel training in the field of critical infrastructure protection in Ukraine. *Bulletin of the National University of Civil Protection of Ukraine. Public Administration Series*, 2(15), 342-350. <https://doi.org/10.52363/2414-5866-2021-2-40>.
2. Skitsko, O., & Shyrshov, R. (2023). Information security management system as a tool for improving the protection and efficiency of critical infrastructure facilities. *International Scientific Journal of Engineering and Agriculture*, 2(6), 12-22. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20230206.02>.
3. Oleksiuk, V. (2025). Green Energy as a tool for resilience and recovery of Ukraine during the war and in the post-war period. *Modern Economics*, 50(1), 136-143. [https://doi.org/10.31521/modecon.v50\(2025\)-18](https://doi.org/10.31521/modecon.v50(2025)-18).
4. Bratel, S. G. (2023). Experience of foreign countries in the field of critical infrastructure security. *South Ukrainian Law Journal*, (3), 261-265. <https://doi.org/10.32850/sulj.2023.3.41>.
5. Umantsiv, Y., & Shkuropadska, D. (2023). National resilience of Ukraine under the martial law. *Scientia Fructuosa*, 151(5), 4-19. [https://doi.org/10.31617/1.2023\(151\)01](https://doi.org/10.31617/1.2023(151)01).
6. Melnik, D. S. (2024). Building a model of threats to Ukraine's national critical infrastructure as a basis for ensuring its security and stability. *Bulletin of Kharkiv National University of Internal Affairs*, 1(104), 237-250. <https://doi.org/10.32631/v.2024.1.20>.
7. *Air raid statistics*. (2026). <https://air-alarms.in.ua/?from=2022-02-24&to=2026-01-01#statistic>.
8. Yaremenko, O. I., & Strakhnitsky, Y. O. (2022). Theoretical and methodological foundations for ensuring the protection of the state's critical infrastructure. *Public Administration: Improvement and Development*, (1). <https://doi.org/10.32702/2307-2156-2022.1.38>.
9. Havrys, A., Yakovchuk, R., Pekarska, O., & Tur, N. (2024). Use of the computer modelling for the analysis of dangerous areas during flooding of territories. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 25(4), 336-343. <https://doi.org/10.12912/27197050/184265>.
10. Havrys, A. P., Filippova, V. V., & Tur, N. Yu. (2024). Information analysis of critical infrastructure protection systems during martial law. *Bulletin of Lviv State University of Life Safety*, (30), 173-187. <https://doi.org/10.32447/20784643.30.2024.17>.
11. Gerasimenko, O. M. (2024). Threats to critical infrastructure facilities in Ukraine under martial law. *Scientific Bulletin of Uzhhorod National University. Law Series*, 84(3), 257-263. <https://doi.org/10.24144/2307-3322.2024.84.3.39>.
12. Gora, I. V., & Batyuk, O. V. (2021). Selected issues of critical infrastructure protection: Foreign experience. *Social and Legal Studies*, (11), 132-139.
13. Kuchma, O. M., & Kotukh, Ye. V. (2023). Critical infrastructure and cyber threats: Achieving the strategic goals of state audit regarding cyber protection of critical infrastructure. *Scientific Perspectives*, 10(40), 161-173. [https://doi.org/10.52058/2708-7530-2023-10\(40\)-161-173](https://doi.org/10.52058/2708-7530-2023-10(40)-161-173).
14. Vhpiliarevych, V., Tocicka, J. W., & Szafranska, K. (2023). Civil protection and protection of critical infrastructure in Ukraine during the conditions of the martial state. *Journal of Security and Sustainability Issues*, 13(1), 265-272. <https://doi.org/10.47459/jssi.2023.13.29>.
15. Biryukov, D. S., & Kondratov, S. I. (2012). *Critical infrastructure protection: Problems and prospects for implementation in Ukraine: Analytical report*. NISD.
16. Murasov, R., Nikitin, A., Meshcheryakov, I., Pidgorodetsky, M., & Poplavets, S. (2024). Improving the scientific and methodological apparatus for calculating the risks of occurrence and analysing scenarios of emergency situations at critical infrastructure facilities. *Social Development and Security*, 14(1), 205-217. <https://doi.org/10.33445/sds.2024.14.1.17>.
17. Franchuk, V. I., Prygunov, P. Ya., & Melnyk, S. I. (2021). Security of critical infrastructure facilities in Ukraine: Organisational and regulatory issues and approaches. *Social and Legal Studies*, (13), 142-148.
18. Ivanytska, O. M., & Voznenko, O. M. (2024). Risk management of critical infrastructure facilities. *Finance of Ukraine*, (6), 93-107. <https://doi.org/10.33763/finukr2024.06.093>.
19. Bani-Meqdad, M. A. M., Senyk, P., Udod, M., Pylypenko, T., & Sylkin, O. (2024). Cyber-environment in the human rights system: Modern challenges to protect intellectual property law and ensure sustainable development of the region. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 19(4), 1389-1396. <https://doi.org/10.18280/ijstdp.190416>.
20. Bohun, V. (2024). Assessing the impact of infrastructure damage on national investment attractiveness during martial law. *Pakistan Journal of Life and Social Sciences*, 22(2), 10379-10385. <https://doi.org/10.57239/pjlss-2024-22.2.00784>.

21. Yakovliev, Y., Rogozhin, O., Stefanyshyn, D., Kreta, D., Anpilova, Y., & Myrontsov, M. (2024). Environmental and geological hazards after the explosion of the Kakhovka hydroelectric power plant and rehabilitation options. *Systems, Decision and Control in Energy VI*, 532-537. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67091-6_25.
22. *Ukrainian energy sector evaluation and damage assessment - X*. (2023). Cooperation for Restoring the Ukrainian Energy Infrastructure project. https://www.energycharter.org/fileadmin/DocumentsMedia/Occasional/2023_05_24_UA_sectoral_evaluation_and_damage_assessment_Version_X_final.pdf.
23. *On critical infrastructure: Law of Ukraine No. 1882-IX*. (2021). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20#Text>.

IMPROVING THE PROTECTION OF UKRAINE ENERGY INFRASTRUCTURE FACILITIES UNDER MARTIAL LAW

P. Bosak, M. Lavrivskyi, O. Liubovetskyi, H. Bosak, V. Vorobets

Lviv State University of Life Safety, Ukraine

KEYWORDS:	ABSTRACT
-----------	----------

critical infrastructure facilities, civil protection, energy security, martial law, cyber threats, fire safety, resilience.

This article examines the crucial issue of ensuring the resilience and protection of Ukraine's energy infrastructure under martial law, particularly in the context of full-scale military aggression by an aggressor state. The energy sector is identified as the primary target of hostile attacks aimed at destabilising the national economy, defence capabilities and social services. The study provides a comprehensive analysis of the security status of Ukraine's energy system, highlighting the multidimensional nature of contemporary threats. These include direct physical destruction via missile and drone strikes, the outbreak of large-scale fires in oil-filled equipment, large-scale cyberattacks on control systems, and hybrid methods of destabilisation. The study's methodology employs a comprehensive approach combining statistical analysis of attack patterns, comparative analysis of threat types, and conceptual modelling. The authors analysed statistical data on infrastructure losses for the period 2022–2025. The study reveals a shift in the aggressor's tactics: from targeting thermal power stations in 2022 to focusing on electricity distribution and transmission networks in 2024–2025. It is noted that direct losses to the energy sector have reached a critical level, estimated at billions of dollars, requiring immediate strategic countermeasures in the field of civil protection. The key theoretical contribution of this article is the development and scientific justification of a hierarchical three-level security management model based on the 'traffic light' principle. This model allows for the application of differentiated response protocols depending on the threat level to optimise the operations of the State Emergency Service of Ukraine. The 'green level' (normal mode) corresponds to a state of system homeostasis, where threats are absent or within acceptable limits, and focuses on monitoring. The 'Yellow Level' (standby mode) is initiated upon receipt of verified information about a potential escalation (e.g. cyber threats, meteorological anomalies or military manoeuvres). The 'Red Level' (crisis mode) is activated following an incident to contain damage, extinguish fires, prevent system collapse and ensure the survival of vital functions. The article argues that, to ensure long-term resilience, a transition is required from the vulnerable, centralised architecture of the Soviet era to a flexible, decentralised network. The proposed set of measures includes the construction of underground energy storage facilities, the installation of modern automatic fire-extinguishing systems, the deployment of autonomous power supply systems (microgrids) and the convergence of physical protection (engineering barriers, anti-drone nets) with integrated cyber protection of information systems. The implementation of these measures aims to minimise response times to emergencies and safeguard the civilian population's life-support systems during military operations.

УДК 614.84:544.77

ФІЗИКО-ХІМІЧНИЙ МЕХАНІЗМ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ НА ПОВЕРХНІ ВОДОЙМ ЗАСОБАМИ НА ОСНОВІ ВИСОКОПОРИСТОЇ ТИРСИ ДЕРЕВИНИ

DOI: 10.52363/2518-1777-2026-21-6

Куценко М. А., ORCID iD 0000-0001-6879-9187

Єлагін Г. І., ORCID iD 0000-0003-2577-6430

Нуянзін О.М., ORCID iD 0000-0003-2527-6073

Алексєєв А. Г., ORCID iD 0000-0003-4114-5807

Гавриленко Н. М., ORCID iD 0009-0004-2143-7575

Кришталь Д. О., ORCID iD 0000-0003-3254-4574

*E-mail: kutsenko_maria@ukr.net

Національний університет цивільного захисту України, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ	АНОТАЦІЯ
Надійшла до редакції: 15.03.2026 Прийнято: 30.04.2026 Опубліковано: 30.05.2026	У статті досліджено фізико-хімічний механізм гасіння пожеж розливів нафти та нафтопродуктів на поверхні водойм засобами на основі високопористої тирси деревини, іммобілізованої амоній- і діамонійфосфатами. Актуальність теми зумовлена зростанням кількості аварій танкерів і ризиком виникнення масштабних пожеж у морських акваторіях, для ліквідації яких традиційні засоби є малоефективними або екологічно небезпечними. Об'єктом дослідження є процес гасіння горючих рідин на поверхні води із застосуванням іммобілізованої тирси сосни. Метою роботи стало встановлення основних факторів, що визначають ефективність дії засобу, та з'ясування механізму інгібування горіння. Досліджено пористість і плавучість матеріалу залежно від вмісту солі, а також процеси піролізу носія й десорбції вогнегасних компонентів за температур 400–600°C. Встановлено, що плавучість зберігається при вмісті солі до 0,7–0,8 г на 1 г тирси, що забезпечує перебування засобу в зоні горіння. Показано, що 77–85 % фосфоровмісних компонентів виділяється вже за 400°C, а при 600–800°C вони використовуються практично повністю. Запропоновано пояснення механізму гасіння, який полягає у взаємодії активних радикалів полум'я з молекулами фосфатних сполук із утворенням менш реакційно здатних комплексів. Наукова новизна полягає в наведенні теоретичних доказів такого топохімічного механізму інгібування горіння фосфатними солями та комплексному обґрунтуванні впливу плавучості, десорбції й інгібування вільнорадикальних ланцюгових реакцій на ефективність засобу. Отримані результати визначають напрями подальшого вдосконалення матеріалу, зокрема підвищення його тривалої плавучості.
КЛЮЧОВІ СЛОВА: гасіння пожеж, нафта, горюча рідина, морські перевезення, вогнегасні засоби, іммобілізація, плавучість, піроліз, інгібування.	

Постановка проблеми. В сучасному світі у дуже великих об'ємах використовуються нафта і продукти її переробки. В багатьох випадках ці речовини доводиться перевозити танкерами. Як і всі інші, ці судна, потрапляють в аварії. В останні роки почастишали катастрофи танкерів російського «тіньового» флоту. Здебільшого цей флот використовує застарілі судна, які давно вичерпали свій ресурс і до морських перевезень

небезпечних речовин допускати не повинні. З пошкоджених танкерів виливаються рідини з густиною, меншою за густину води. Площа такого розливу може сягати декількох квадратних кілометрів, забруднюючи і море і прибережжя. Ще гірше те, що більшість аварій супроводжується загоранням. А гасіння таких пожеж є дуже складною задачею. Спеціально для гасіння пожеж горючих рідин на поверхні водойм розробляються засоби припинення горіння на основі тирси

деревини, іммобілізованої вогнегасними солями. Для вдосконалення цих засобів актуальними і важливими є питання встановлення всіх аспектів їх застосування і, в першу чергу, дослідження окремих стадій процесу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. При розливі нафти в'язка рідина щільним шаром вкриває поверхню водойми, ізолюючи її від повітря і викликаючи задуху морських тварин. В багатьох випадках ці виливи ще й загоряються. При цьому в повітря викидається величезна кількість продуктів повного і неповного згорання, вкрай шкідливих для всього живого. А в поверхневих шарах роками перебувають смолоподібні залишки горіння [1]. В гонитві за збільшенням прибутків перевізники постійно збільшують розміри своїх танкерів. На сьогодні танкер за один раз в середньому везе більше 20 тис. т пожежонебезпечної речовини [2]. За статистикою, аварійність танкерів призводить до щорічної загибелі понад 200 суден. Надалі прогнозується погіршення ситуації у тому числі і через військові дії на Близькому сході. Одна з головних причин такого стану – застарілість танкерного флоту. Виводити з експлуатації і утилізувати судна, особливо великотоннажні, дуже дорого, тому вже зараз у світовому торговельному флоті налічується більш як 20% кораблів віком понад 30 років [2]. Причинами аварій можуть бути також і військові дії, і стихійні лиха, і невдале керування і цільові терористичні акти. 26.01.2024 єменські хусити атакували в Аденській затоці Червоного моря нафтовий танкер Marlin Luanda, який перевозив нафту. Пожежу на судні гасили кілька годин, про наслідки не повідомлялося [3]. В більшості ж випадків в подібних аваріях гинуть люди. Два великих нафтових танкери зіткнулися і загорілися 19.07.2024 поблизу Сінгапуру. Загинули понад 60 членів екіпажів обох суден: Ceres I та Hafnia Nile [4]. 10.03.2025 в Північному морі біля узбережжя Східного Йоркширу контейнеровоз Solong врізався в нафтовий танкер Stena Immaculate, який віз

авіаційне паливо і в момент зіткнення стояв на якорі. Частина палива з танків потрапила у море і почалася пожежа, яка вирувала більше двох діб [5]. Судна Adalynn та Front Eagle 17.06.2025 горіли поблизу Ормузької протоки [6]. 26.03.2025 спалахнула пожежа на судні «Crystal Asia», постраждали шестеро членів екіпажу [7]. За підрахунками Politico та журналістської групи Source Material судна «тіньового флоту» за три останні роки спричинили утворення не менше дев'яти величезних нафтових плям [8]. Як виявлено, більшість танкерів були побудовані більше двадцяти років тому. За міжнародними правилами термін служби танкера не повинен перевищувати двох десятиків років. Далі він підлягає утилізації, яка обходиться достатньо дорого. Тому власники застарілих танкерів задешево продають їх. Середній вік танкерів, які перевозили нафту, у 2021 році становив 8,9 років, у 2024 – їх вік збільшився. За рахунок таких старих суден потужність «тіньового флоту» нафтових танкерів за цей період зросла майже на 70%. Застарілі танкери цього флоту і недостатня підготовка екіпажів, створюють загрозу для безпеки судноплавства всього світу, але особливо реальна ця загроза для прибережних країн Чорного моря. Кілька великих аварій танкерів відбулось у Чорному морі та Керченській протоці з 2019 до 2025. Так, 21.01.2019 виникла пожежа в Керченській протоці на борту танкерів «Кенді» та «Маестро», які перевозили скраплений газ. При переливанні цього газу з одного судна на інше стався вибух, після чого почалася пожежа, яка тривала до середини березня 2019 [9]. 15.12.2024 у Керченській протоці під час шторму затонули «Волгонефть 212» і «Волгонефть 239». В танках цих суден разом містилося 9 тисяч тонн мазуту. Обійшлося без загорання, але витекли і спливли на поверхню тисячі тонн мазуту. Отруйні в'язкі плями почали стрімко поширюватися Чорним морем, викликаючи екологічну катастрофу на узбережжі Краснодарського краю та у Чорному морі взагалі. На початку січня 2025 ці плями були виявлені біля Севастополя, а 12 січня

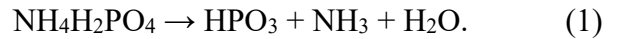
досягли Азовського моря. Шкідлива в'язка речовина місяцями трималась на поверхні і Азовського і Чорного морів. Навіть на узбережжі Одещини, яка знаходиться за сотні міль від Керченської протоки, через півроку (04.06.2025) були виявлені значні плями цього мазуту. Такий витік мазуту, за даними науковців, є найбільшим за всю історію Чорного моря [10]. Отже, Україна, Туреччина, Грузія і інші держави Причорномор'я постійно ризикують появою біля своїх берегів великих палаючих плям. В разі виникнення таких пожеж біля своїх берегів, боротися з ними доведеться співробітникам ДСНС України. Отже, необхідно мати запас ефективних засобів, спеціально призначених для гасіння пожеж горючих рідин на поверхнях водоймищ.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття. Для зниження шкоди від виливів нафтопродуктів на поверхню водойм застосовують два способи. Невеликі об'єми розлитих вуглеводнів можна зібрати сорбцією їх розсипаними на поверхню гранульованими адсорбентами з наступним збором цих адсорбентів сітками і подальшим вивільненням з них вуглеводнів відгонкою з водяною парою. При масштабних виливах – збирають горючу рідину разом з верхніми шарами води. Сепарація емульсії дозволяє врятувати частину розливої рідини і, в першому наближенні, очистити від її залишків воду. Але реалізація обох методів неможлива, коли поверхня палає. Перш, ніж розсипати сорбент, або збирати емульсію, необхідно загасити пожежу. Проте спеціальних засобів гасіння пожеж горючих рідин на поверхні водойми не розроблено. Засоби, існуючі на сьогоднішній день, в цьому випадку або взагалі неможливо використовувати, або вони – малоефективні та шкідливі для довкілля. Вуглеводні легші за воду, тож при використанні води, вона швидко опиняється під шаром нафти або продуктів її переробки, і лише сприяє розтіканню палаючої рідини та збільшенню площі пожежі. Інертні гази флегматизують

горючу суміш тільки при значній концентрації їх в зоні горіння, що на відкритих просторах створити практично неможливо. Найбільш ефективними засобами гасіння пожеж вважаються вогнегасні речовини, які діють за фізико-хімічним механізмом інгібування, тобто придушують горіння дезактивацією активних частинок – вільних радикалів. За таким механізмом пожежу гасять хладони і вогнегасні порошкові композиції. Але, як і у випадку з інертними газами, створити в зоні горіння на відкритому просторі потрібну концентрацію хладону нереально. До того ж ці речовини небезпечні у поводженні при застосуванні, шкідливі для довкілля і руйнують озоновий шар Землі. Гіпотетично, можна було б застосувати звичайні вогнегасні порошки. Але всі порошки мають питому густину, значно більшу і за густину води, і за густину нафти та нафтопродуктів. При нанесенні на поверхню водойми, вкриту цими вуглеводнями, вони швидко занурюються під шар горючої рідини, розчиняються у воді і залишають зону горіння. Для гасіння пожеж розливої нафти на морі в більшості випадків використовують повітряно-механічні піни, що має суттєві недоліки. Потрапивши на поверхню, піна довго не тримається, інтенсивні теплові потоки швидко руйнують її, вимагаючи постійної подачі свіжих порцій. Крім того, більшість сучасних піноутворювачів – речовини синтетичні. Потрапляючи до водойми, вони отруюють воду, викликаючи масову загибель фауни та флори. Застосування піни веде також до значних труднощів при реалізації способу сепарації суміші вуглеводню з верхнім шаром води. Піна викликає утворення стійкої емульсії нафти з морською водою. Зруйнувати таку емульсію, щоб відокремити нафту, яка ще не згоріла, і очистити від її залишків воду – дуже складно. Більш придатними способами гасіння горючих рідин ізолюючими засобами видаються способи, в основі яких – застосування гранульованого піноскла, змоченого водним розчином рідкого скла [11], і бінарні системи на основі того ж

гранульованого піноскла та гранульованих перліту або вермікуліту [12]. Для гасіння пожеж рідин в резервуарах ці системи є оптимальними. Вірогідно, з екологічної точки зору вони теж менш шкідливі ніж піни. Але плівка, яку ці системи утворюють, навряд чи буде зберігати свою цілісність під дією морських хвиль. А саме створення достатньо щільного шару значної товщини – сенс усіх ізолюючих засобів. Інакше тимчасово неприкриті ділянки будуть центром повторного спалахування там, де горіння було ліквідовано, а плівка піни вже розірвана. Створення щільного шару не є обов'язковим при використанні засобів, які являють собою високопористу тирсу деревини з вогнегасними солями, іммобілізованими на внутрішній поверхні пор [13-14]. При цьому оптимальними виявилися тирса сосни та вільхи. Незначна насипна маса ($0,3-0,6 \text{ г/см}^3$) сприяє тому, що засіб завжди плаває на поверхні рідини. Під дією теплоти пожежі тирса, просочена вогнегасною сіллю, не горить, а піролізується. Розкладання низькомолекулярних компонентів деревини починається вже при температурі $150-270^\circ\text{C}$. При температурі $270-450^\circ\text{C}$ проходить термоліз основних її компонентів: целюлози, геміцелюлози та лігніну, які в основному переходять в леткі продукти. Карбонізація з формуванням твердого залишку закінчується при температурі $450-600^\circ\text{C}$. На початкових стадіях виділяється суміш несконденсованих газів (H_2 , CO , CO_2 , CH_4 та ін.) і рідких продуктів (tar). Ці рідини далі теж розкладаються до газів. При температурі $500-600^\circ\text{C}$ лишаються тільки гази, і тверда фракція (char) — деревне вугілля із збільшеними порами та декілька відсотків мінералізованих речовин. При горінні нафти середня температура полум'я досягає $900-1100^\circ\text{C}$. Отже, після внесення в зону горіння деревини, вона швидко перетворюється на газову фазу і твердий високопористий залишок. Що стосується солей амонію, то діамонійфосфат при нагріванні до температури 155°C одночасно з плавленням розкладається на

аміак та амонійфосфат; останній при температурі 250°C розкладається на аміак, воду та метафосфатну кислоту:



В свою чергу метафосфатна кислота при температурі 300°C перетворюється в декілька полімерних фосфатних кислот, які володіють вогнегасними властивостями. Таким чином, при введенні в зону горіння нафти, температура в якій набагато вища, навіть за температури кінцевої стадії піролізу деревини, тирса швидко перетворюється у високопористий кокс, вивільнюючи вогнегасні компоненти. І вогнегасні солі, і продукти їх розпаду потрапляють безпосередньо в зону горіння. Над кожною піролізованою частинкою утворюється хмара тонкорозпиленого інгібітору. Навіть, якщо шар засобу не щільний, в сумі ця хмара повністю перекриває зону горіння. У виробництві засіб нескладний та недорогий. Речовини, з яких він виготовляється, для довілля нешкідливі. Гасіння полум'я тут відбувається в три етапи. Спочатку тирса повинна піролізуватися, потім вогнегасні солі і продукти їх розпаду повинні десорбуватися із залишків деревини і надалі вступати у взаємодію з активними частинками горіння. Таким чином, перебіг процесу гасіння в цьому випадку визначається трьома факторами: плавучістю засобу, яка забезпечує постійне знаходження його на поверхні рідини, тобто у зоні її горіння; виходом вогнегасних компонентів з пор піролізованого носія (десорбцією) і, власне, здатністю дезактивувати активні частинки горіння. Для визначення напрямків подальшого удосконалення складу і способу виготовлення засобу необхідно дослідити фізико-хімічний механізм впливу кожного з факторів..

Формулювання цілей дослідження. Для вирішення поставленої мети були визначені задачі:

- дослідження умови плавучості тирси, іммобілізованої вогнегасними солями;

- дослідження фізичного процесу десорбції вогнегасних компонентів з піролізованих залишків в умовах, наближених до реальних.

- аналіз топохімічних аспектів взаємодії десорбованих вогнегасних компонентів з активними частинками горіння з гіпотезою, яка полягає в дезактивації активних частинок горіння шляхом взаємодії їх з цілими молекулами інгібітору;

- аналіз отриманих результатів, з гіпотезою про механізм дії та умови застосування засобів на основі тирси деревини, іммобілізованої вогнегасними солям, для гасіння пожеж розливів нафти на поверхні водойм та визначенням напрямків подальших досліджень.

Виклад основного матеріалу дослідження. В якості носія в дослідженнях використовувалася тирса сосни (табл. 1). Всі зразки промивалися дистильованою водою та висушувалися при температурі 80–90°C. Після підготовки вони поділялися на ті, що призначені для «холостих» проб, і ті, що далі іммобілізувалися розчинами амоній- та діамонійфосфатів. Еластичність стінок капілярів деревини дозволяє проводити операції іммобілізації простим стисканням–відпусканням їх у розчинах потрібних солей [13,14]. При цьому тирса вибирає розчин подібно губці. В лабораторних умовах ці операції проводилися в гумових рукавицях, для напівпромислового виробництва запропоновано металеві сітки на держакх [15]. Капіляри «холостих» проб таким же чином заповнювалися водою. І робочі, і холості зразки далі знов висушувалися в сушильний шафі та, для повного видалення вологи, витримувалися протягом 3–4 годин у вакуумному ексікаторі за залишковим тиском в 1–3 мм рт. ст. Таке ретельне висушування проводилося лише задля отримання надійних результатів із вмісту солі при наступних зважуваннях. В напівпромисловому виробництві необхідності в цьому немає. Було підготовлено 8 зразків: 4 – іммобілізованих амонійфосфатом і 4 – діамонійфосфатом.

Далі досліджувалися пористість та плавучість і втрата маси при нагріві.

Залежність плавучості засобу від вмісту адсорбованої вогнегасної солі визначалася за допомогою простого приладу, який дозволяє проводити експрес-тести об'єму порожнин високопористих матеріалів, що мають низьку насипну густину, і складається з вимірювального циліндру і штоку з сіткою [16]. Спочатку визначалася пористість. Кожна частинка тирси сосни складається з власне деревини і порожнин, які заповнює повітря. Питома густина матеріалу сосни (суми геміцелюлози, целюлози, лігнінів і ін.) в середньому складає 1,5 г/см³, питома густина амонійфосфату – 1,8 г/см³, діамонійфосфату – 1,6 г/см³. Об'єм, який займають порожнини у «холостому» зразку можна визначити, віднявши від загального об'єму зразка його масу, поділену на 1,5. При визначенні об'єму порожнин в іммобілізованих зразках від цієї цифри треба відняти ще масу відповідної солі, поділену на її густину. В циліндрі з водою, штоком і сіткою замірявся об'єм. Під сітку вносилися і придавлювалися нею зважена кількість засобу. Замірявся новий об'єм і обчислювалася пористість. Результати наведено в табл. 1.

Після цього шток приладу з сіткою виймався і на тих самих зразках в тому ж циліндрі визначалася плавучість. Вміст перемішувався і замірявся об'єм верхнього шару. Перемішування і замір повторювалися через певні проміжки часу протягом 48 годин. Результати наведено в табл. 2.

Однією з основних стадій впливу засобу на пожежу є стадія піролізу деревини і десорбції вогнегасної солі та продуктів її розкладу з пор піролізованого носія. Очевидно, що, разом з газоподібними продуктами піролізу деревини, першими пористий носій залишають леткі аміак та пари води. Кінцевий фосфоровмісний продукт розкладу обох використаних вогнегасних солей є сумішшю полімерних фосфорних кислот, які власне і інгібують вільнорадикальні процеси. Піроліз деревини і десорбцію з неї вогнегасних

компонентів вивчали за втратою маси холостих і іммобілізованих зразків протягом 10 хвилин послідовно при температурі 400 та, 600°C. Зразки у фарфоровій випарній чашці зважувалися і поміщалися всередину установки, розташованої у витяжній шафі і нагрітої до потрібної температури. Для попередження горіння (забезпечення саме піролізу) установка продувалася азотом. Через 10 хвилин витримки чашка виймалася, охолоджувалася до кімнатної температури, зважувалася і поміщалися в установку, нагріту до наступної визначеної температури. Після перерахунку на 1 г тирси по різниці втрати маси визначався вихід фосфатних солей і продуктів їх розпаду Δm . Очевидно, що леткі аміак та пари води першими залишають пористий носій. Кількість саме фосфоровмісних сполук, що виходять з 1 г тирси dm_{ϕ} визначається з виразу $dm_{\phi} = \Delta m (1 - k)$, де k – вміст аміаку та парів води в продуктах розкладу фосфатної солі. Для амонійфосфату він дорівнює 0,304, для діамонійфосфату 0,394. Результати дослідження наведено в табл. 3-5.

Горіння розглядається як ланцюговий вільнорадикальний процес, у якому ключову роль відіграють активні частинки

– радикали. Інгібування горіння полягає у зниженні їх концентрації або реакційної здатності. Отже, те, що інгібітор припиняє горіння, дезактивуючи саме активні частинки, - заперечень не викликає. Але погляди на топохімію цього процесу розходяться. В роботі проведено оцінку існуючих поглядів і висунуто пояснення, яке, на думку авторів, логічніше відображає глибинний механізм інгібування горіння.

Пористість і плавучість.

З табл. 1-2, у випадку обох солей пористість зразків іммобілізованої тирси із збільшенням ступеню іммобілізації закономірно зменшується. Те саме стосується терміну знаходження засобу на поверхні води, тобто його плавучості (табл. 2), яка із збільшенням питомої густини іммобілізованої тирси теж знижуються. Насипна щільність сосни складає 65-105 кг/м³. При сорбції вогнегасної солі ця щільність збільшується і за рахунок зменшення проміжків між частинками, і, головне, за рахунок збільшення питомої густини. Поверхневий натяг води заважає їй проникнути у вузькі пори деревини – капіляри, але сіль в порах поступово все-таки втягує вологу, що викликає витіснення повітря та збільшення і питомої густини і насипної маси.

Таблиця 1 – Залишкова пористість досліджених зразків (А-амонійфосфат, ДА-діамонійфосфат)

№ з/п	Сіль, г/г сосни	Маса, г			Об'єм, см ³				Пористість, см ³ /г
		Зразка	Деревини	Солі	Зразка	Деревини	Солі	Пор	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Хол.	-	22,61	22,61	-	50,32	15,07	-	35,25	1,56
1	А 0,28	2,90	2,27	0,63	5,04	1,51	0,35	3,18	1,10
2	А 0,42	4,72	3,32	1,40	7,40	2,21	0,78	4,41	0,93
3	А 0,56	3,89	2,49	1,40	5,66	1,66	0,78	3,22	0,83
4	А 0,64	6,91	4,21	2,70	9,41	2,81	1,5	5,10	0,74
5	ДА 0,34	4,85	3,62	1,23	8,08	2,41	0,77	4,90	1,01
6	ДА 0,48	7,42	5,01	2,41	11,17	3,34	1,51	6,32	0,85
7	ДА 0,61	5,17	3,21	1,96	7,16	2,14	1,23	3,79	0,73
8	ДА 0,79	9,89	5,53	4,36	12,36	3,68	2,73	5,95	0,60

Таблиця 2 – Питома густина і плавучість досліджених зразків(А-амонійфосфат, ДА-діамонійфосфат)

№ з/п	Сіль, г/г сосни	Маса зразка, г	Об'єм зразка, см ³	Питома густина, г/см ³	Кількість осаду (%) (витримка, год.)			
					0	8	24	48
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Хол.	-	22,61	50,32	-	0	0	0	0
1	А 0,28	2,90	5,04	0,449	0	1,0	19,0	53,1
2	А 0,42	4,72	7,40	0,638	0	2,2	27,8	64,4
3	А 0,56	3,89	5,66	0,687	0	3,6	33,7	73,2
4	А 0,64	6,91	9,41	0,734	0	4,7	42,6	85,2
5	ДА 0,34	4,85	8,08	0,600	0	2,0	31,7	64,9
6	ДА 0,48	7,42	11,17	0,664	0	3,4	34,5	70,3
7	ДА 0,61	5,17	7,16	0,722	0	4,4	41,2	76,7
8	ДА 0,79	9,89	12,36	0,800	0	5,6	52,7	89,9

Зрозуміло, що 8 годин плавучості для гасіння переважної більшості пожеж на морі цілком достатньо, але деякі з таких пожеж продовжуються тижнями. Крім того, солі здатні натягувати вологу і при зберіганні. Тому подальшим напрямком вдосконалення засобу повинні бути дослідження, спрямовані на захист капілярів іммобілізованої деревини від проникнення води і її парів.

Піроліз і десорбція. З наведених нижче таблиць (3-5), основна кількість

фосфатних солей (77–85%) десорбується і розкладається при температурі 400°C. Залишки цих солей майже повністю видаляються до температурі 600°C. До температури 800°C закінчується і піроліз сосни, залишається лише високопористе деревне вугілля. Отже, при внесенні засобу в зону горіння нафти і продуктів її переробки, вогнегасні компоненти використовуються практично повністю.

Таблиця 3 – Втрата маси тирсою сосни при нагріві протягом 10 хвилин

№ з/п	Маса, г	Втрата маси (г) при температурі, °C					
		400		600		800	
		Всього	На 1 г сосни	Всього	На 1 г сосни	Всього	На 1 г сосни
1	10,22	6,83	0,67	7,98	0,78	8,48	0,83
2	12,61	8,10	0,64	5,91	0,73	10,21	0,81
3	8,31	5,64	0,68	4,46	0,79	0,81	0,85
4	Середня		0,66		0,77	4,79	0,83

Таблиця 4 – Втрата маси іммобілізованими зразками при нагріві протягом 10 хвилин за температури 400°C

№ з/п	Сіль, г/г сосни	Маса, г			Втрата маси, г				Вихід фосфоровмісних, г/г сосни, dmf
		зразка	сосни	солі	Всього			Солі (г на 1 г сосни) Δm	
					зразка	сосни	солі		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	А 0,28	4,42	3,45	0,97	3,08	2,28	0,80	0,23	0,16
2	А 0,42	6,74	4,75	1,99	4,79	3,14	1,65	0,35	0,24
3	А 0,56	5,63	3,61	2,02	4,06	2,38	1,68	0,44	0,31
4	А 0,64	8,47	5,16	3,31	6,31	3,70	2,61	0,51	0,35
5	ДА 0,34	9,36	6,99	2,37	6,58	4,61	1,97	0,28	0,17
6	ДА 0,48	5,91	3,99	1,92	4,24	2,63	1,61	0,40	0,24
7	ДА 0,61	8,79	5,46	3,33	6,46	3,60	2,86	0,52	0,32
8	ДА 0,79	10,18	5,69	4,49	7,22	3,76	3,46	0,61	0,37

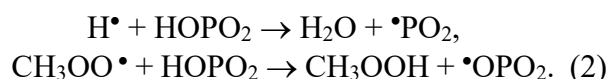
Таблиця 5 – Втрата маси іммобілізованими зразками при нагріві протягом 10 хвилин за температури 600°C

№ з/п	Сіль, г/г сосни	Маса, г			Втрата маси, г				Вихід фосфоровмісних, г/г сосни, dmф
		зразка	сосни	солі	Всього			Солі (г) на 1 г сосни, Δm	
					зразка	сосни	солі		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	A 0,28	4,42	3,45	0,97	3,61	2,66	0,95	0,28	0,19
2	A 0,42	6,74	4,75	1,99	5,61	3,66	1,95	0,41	0,29
3	A 0,56	5,63	3,61	2,02	4,76	2,78	1,96	0,54	0,38
4	A 0,64	8,47	5,16	3,31	7,15	3,97	3,18	0,62	0,43
5	ДА 0,34	9,36	6,99	2,37	7,63	5,38	2,25	0,32	0,19
6	ДА 0,48	5,91	3,99	1,92	4,98	3,07	1,91	0,48	0,29
7	ДА 0,61	8,79	5,46	3,33	7,43	4,20	3,23	0,59	0,36
8	ДА 0,79	10,18	5,69	4,49	8,69	4,38	4,31	0,76	0,46

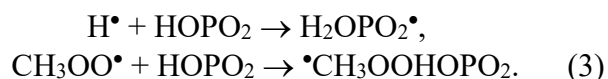
Топохімія інгібування горіння вогнегасними порошками. Питання хімічних і фізичних процесів, які лежать в основі інгібування горіння, задовільного пояснення на сьогодні не має. За однією з існуючих теорій, активні частинки горіння адсорбуються поверхнею інгібітору і реагують між собою, спарюючи вільні електрони і обриваючи ланцюг. Але, по-перше, горіння за механізмом інгібування припиняють не лише тверді інгібітори, а і рідкі та газоподібні. По-друге, виключно висока селективність поверхні інгібітору саме до вільних радикалів, концентрація яких одна-дві частинки серед мільярдів молекул горючої речовини, кисню, азоту і продуктів горіння, - мало вірогідна. За іншою теорією, інгібітор сам розкладається в зоні горіння за гомолітичним механізмом, теж утворюючи вільні радикали. Утворені радикали реагують з активними частинками горіння, ліквідуючи вільну валентність, і свою, і активної частинки горіння. Але, знов-таки, концентрація активних частинок в зоні горіння зникаючи мала. Кожної миті їх утворюється дуже мало, одна-дві на мільярди цілих молекул. Гомолітичний розклад інгібітору теж проходить дуже незначною мірою і концентрація утворених ним радикалів, не більша за концентрацію активних частинок горіння. Вірогідність зустрічі саме цих двох частинок, розподілених в мільярді цілих молекул, дуже мала. Більш логічним видається пояснення, яке панує в суміжній галузі, хімії високомолекулярних сполук.

Вільнорадикальна полімеризація теж розвивається за ланцюговим механізмом, обумовленим структурами з вільною валентністю. Для сповільнення або попередження полімеризації в розчин вводять речовини, атоми молекул яких мають на зовнішніх орбіталях велику кількість електронів (гідрокінони і ін). В розчинах ніяка адсорбція місця не має. Процеси полімеризації часто проводять «на холод» (за кімнатної температури), що виключає гомоліз молекул інгібітору. Вважається, що до ланцюга, який росте, приєднується ціла молекула інгібітору. Цих молекул в системі значна кількість (декілька відсотків від об'єму), і зустріч ланцюга з ними має дуже високу вірогідність. В результаті, вільна валентність ланцюга не пропадає, його неспарений електрон парується з електроном молекули інгібітору, розбиваючи одну з пар в цій молекулі. Ланцюг тепер і далі являє собою вільний радикал, але на його кінці розташована структура з великою кількістю електронних пар на зовнішніх орбітах атомів. Вільний електрон в таких структурах має можливість мігрувати всередині молекули (в термінах теорії резонансу він «делокалізується»). Такий радикал існує у вільному вигляді не мільйонні, а десяті частки секунди, а то й цілі секунди. Відомі навіть випадки, коли дослідники отримували радикали, що існували у вільному вигляді декілька годин. Можна припустити, що гальмування

процесів горіння відбувається аналогічно, тобто взаємодією активних частинок горіння саме з цілими молекулами інгібітору. Останніх в зоні горіння кожної миті не одна-дві на мільярд інших молекул, а 2-3%. При взаємодії активна частинка горіння відриває від молекули інгібітору атом чи групу атомів, або приєднується до цієї молекули, утворюючи комплекс. В першому випадку неспарений електрон з'являється в залишку молекули інгібітору:



В другому – вільна валентність переходить в утворений комплекс:



І залишок молекули інгібітору, і новий комплекс, не дивлячись на вільну валентність, мають активність значно нижчу, ніж частинки горіння. Різниця полягає в кількості електронних пар на зовнішніх орбітах атомів. У вільному радикалі, утвореному з гідрогену $\text{H}^\bullet$, електрон взагалі тільки один; коли горять метан або його аналоги, на зовнішніх орбіталах кінцевих атомів максимум 7 електронів:



На відміну від цих частинок, і в залишку молекули інгібітору і в утвореному комплексі вільний електрон має для делокалізації значно кращі умови. Наприклад, в молекулах солей фосфатної кислоти знаходяться 15 електронів на орбіталах трьох енергетичних рівнів, в молекулах поліфосфатних кислот вдвічі-втричі більше. Чим більша кількість електронів на зовнішніх орбіталах, тим кращі умови для делокалізації має вільний електрон, утворюючи тимчасові пари всередині цього радикалу. І тим меншу схильність приймати участь в реакціях за

межами такого радикалу демонструє вільний електрон. Такий радикал може існувати у вільному вигляді десятки частки секунди і більше. За цей час система встигає охолотитися, швидкість реакції горіння зменшується і, врешті-решт, падає до 0.

Висновки та напрями подальших досліджень.

1. Дослідження умов плавучості показало, що засіб на основі тирси сосни зберігає здатність триматися на поверхні води при вмісті фосфатних солей до 0,7–0,8 г на 1 г тирси. Встановлено, що протягом перших 8 годин у осад випадає не більше 5% матеріалу, проте за 48 годин цей показник зростає до 50–85% залежно від концентрації солі, що вказує на необхідність подальшої гідрофобізації пор для тривалого використання.

2. Процес виходу діючих речовин з піролізованого носія відбувається ефективно в умовах пожежі. Основна частина фосфоровмісних компонентів (77–85%) виділяється вже при температурі 400°C, а при підвищенні температури до 600–800°C (що нижче за температуру полум'я нафти) вони використовуються практично повністю.

3. Запропоновано пояснення топочимії процесу — гасіння відбувається не через просту адсорбцію, а шляхом взаємодії активних радикалів полум'я з цілими молекулами фосфатних сполук. Утворені при цьому комплекси мають делокалізований вільний електрон, що різко знижує їхню реакційну здатність і веде до обриву ланцюгових реакцій горіння.

4. Проаналізовані результати підтверджують, що використання високопористої тирси з іммобілізованими солями є екологічно безпечною та ефективною альтернативою традиційним пінам і порошкам для гасіння розливів нафти на воді. Подальші дослідження мають бути спрямовані на підвищення тривалої плавучості засобу шляхом захисту капілярів деревини від проникнення вологи.

Конфлікт інтересів: Нуянзін О. М. є членом редакційної колегії журналу «Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека», але не брав жодної участі в процесі рецензування цієї статті, обговоренні чи прийнятті рішення щодо її публікації. Процедура розгляду рукопису повністю забезпечувалася незалежними членами редколегії та зовнішніми рецензентами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Mitigating marine oil spills: A review of spill behavior, response technologies, and emerging strategies / J. Liu et al. *Marine Pollution Bulletin*. 2026. Vol. 224. 119178. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.119178>.
2. Заблоцький В. Морські катастрофи. Неісторичний контекст. *Тиждень*. URL: <https://tyzhden.ua/morski-katastrofy-neistorychnyj-kontekst> (дата звернення: 31.07.2025).
3. У Червоному морі після атаки хуситів загорівся нафтовий танкер. *Слово і діло*. URL: <https://www.slovoidilo.ua/2024/01/27/novyna/svit/chervonomu-mori-pislya-ataky-xusyitiv-zahorivsysya-naftovyj-tanker> (дата звернення: 31.07.2025).
4. Капустянська І. Внаслідок зіткнення нафтових танкерів біля Сінгапуру загинули понад 60 членів екіпажу. *LB.ua*. URL: https://lb.ua/world/2024/07/19/625077_vnaslidok_zitknennya_naftovih.html (дата звернення: 31.07.2025).
5. Британія: у Північному морі зіткнулися танкер та контейнеровоз. *УНІАН*. URL: <https://www.unian.ua/world/britaniya-u-pivnichnomu-mori-zitknulisya-tanker-ta-kon-teynеровoz-12941118.html> (дата звернення: 31.07.2025).
6. Зіткнення танкерів біля Ормузької протоки: загорілося судно, яке під санкціями України. *Король Данило*. URL: https://www.koroldanylo.com.ua/news/zitknennia_tankeriv_bilia_ormuzkoyi_protoki_zagorilosia_sudno_iake_pid_sankciiami_u_krayini_19575 (дата звернення: 31.07.2025).
7. Біля берегів Південної Кореї горіло російське судно, є постраждалі. *Укрінформ*. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-world/3975033-bila-beregiv-pivdennoi-korei-zagorilosa-rosijske-sudno-e-postrazdali.html> (дата звернення: 31.07.2025).
8. Кравченко Г. Російський «тіньовий флот» залишає розливи нафти по всьому світу. *Укрінформ*. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-world/3917116-rosijskij-tinovij-flot-zalysae-rozlivi-nafti-po-vsomu-svitu-politico.html> (дата звернення: 31.07.2025).
9. Пожежа в Чорному морі: палаючі судна небезпечно накренилися. *Кореспондент*. URL: <https://ua.korrespondent.net/ukraine/4056409-pozhezha-v-chornomu-mori-palauichi-sudna-nebezpechno-nakrenylisia> (дата звернення: 31.07.2025).
10. Танкери-смертники у Керченській протоці: рф продовжує використовувати судна серії «Волгонефть» для військових поставок палива у Крим. *Крим.Реалії*. URL: <https://ua.krymr.com/a/tankery-smertnyky-kerchenska-protoka-rf-sudna-serii-volhoneft-krym-palyvo/33256010.html> (дата звернення: 31.07.2025).
11. Спосіб гасіння горючих та легкозаймистих рідин бінарною системою на основі гранульованого піноскла : пат. на корисну модель 139094 Україна. № у 2019 06282 ; заявл. 06.06.2019 ; опубл. 26.12.2019, Бюл. № 24.
12. Спосіб гасіння резервуарів з горючими та легкозаймистими рідинами : пат. на корисну модель 123563 Україна. № у 2017 08465 ; заявл. 17.08.2017 ; опубл. 26.02.2018, Бюл. № 4.
13. Спосіб виготовлення вогнегасного засобу : пат. на корисну модель 136531 Україна. № у 2019 01844 ; заявл. 25.02.2019 ; опубл. 27.08.2019, Бюл. № 16.
14. Вогнегасний засіб : пат. на корисну модель 136533 Україна. № у 2019 01847 ; заявл. 25.02.2019 ; опубл. 27.08.2019, Бюл. № 16.
15. Техніко-економічне обґрунтування організації виготовлення засобів для гасіння пожеж горючих рідин на основі вогнегасних солей, іммобілізованих пористим носієм / М. А. Купенко та ін. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація* : зб. наук. пр. ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2019. Т. 3, № 1. С. 42–50.
16. Пристрій для експрес визначення порожнистості подрібнених дрібнопористих матеріалів з низькою насипною масою : заявка на винахід а 2020 01522 Україна / Г. І. Єлагін та ін. ; зареєстр. 11.05.2022.

REFERENCES

1. Liu, J., Tao, L., Zhu, D., Zhang, S., & Wang, J. (2026). Mitigating marine oil spills: A review of spill behavior, response technologies, and emerging strategies. *Marine Pollution Bulletin*, 224, 119178. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.119178>.
2. Zablotskiy, V. (2019). *Morsky katastrofy. Neistorychnyi kontekst*. Defense Express. <https://tyzhden.ua/morski-katastrofy-neistorychnyj-kontekst>.
3. Slovo i Dilo. (2024, January 27). *U Chervonomu mori pislia ataky khusyitiv zahorivsysya naftovyj tanker*. <https://www.slovoidilo.ua/2024/01/27/>.
4. Kapustianska, I. (2024, July 19). *Vnaslidok zitknennia naftovykh tankeriv bilia Singapuru zahynuly ponad 60 chleniv ekipazhu – Reuters*. *LB.ua*. <https://lb.ua/world/2024/07/19/625077.html>.
5. UNIAN. (n.d.). *Brytaniia: U Pivnichnomu mori zitknulisya tanker ta konteynerovoz*. <https://www.unian.ua/world/britaniya-u-pivnichnomu-mori-zitknulisya-tanker-ta-konteynerovoz-12941118.html>.
6. Bloomberg. (2025, June 17). *Zitknennia tankeriv bilia Ormuzkoi protoky: Zahorilosia sudno, yake pid sanktsiiamy Ukrainy*. https://www.koroldanylo.com.ua/news/zitknennia_tankeriv_bilia_ormuzkoyi_protoky_zagorilosia_sudno_iake_pid_sankciiami_u_krayini_19575.
7. Ukrinform. (n.d.). *Bilia berehiv Pivdennoi Korei zahorilosia rosiiske sudno, ye postrazhdali*. <https://www.ukrinform.ua/rubric-world/3975033>.
8. Kravchenko, G. (n.d.). *Rosiiskyi tinoviy flot zalyshaie rozlyvy nafty po vsomu svitu – Politico*. *Ukrinform*. <https://www.ukrinform.ua/rubric-world/3917116>.
9. Korrespondent. (2019, January 22). *Pozhezha v Chornomu mori: Palaiuchi sudna nebezpechno nakrenylisia*. <https://ua.korrespondent.net/ukraine/4056409>.

10. Krym.Realii. (2024, December 28). *Tankery-smertnyky u Kerchenskii prototsi: RF prodovzhuie vykorystovuvaty sudna serii Volhoneft dlia viiskovykh postavok palyva u Krym*. <https://ua.krymr.com/a/33256010.html>.
11. *Sposib hasinnia horiuchykh ta lehkozaymystykh ridyn binarnoiu systemoiu na osnovi hranuliovanoho pinoskla*. Patent Ukrainy No. 139094 (2019). Published December 26, 2019.
12. *Sposib hasinnia rezervuariv z horiuchymy ta lehkozaymystymy ridynamy*. Patent Ukrainy No. 123563 (2018). Published February 26, 2018.
13. *Sposib vyrobnytstva vohnehasnoho zasobu*. Patent Ukrainy No. 136531 (2019). Published August 27, 2019.
14. *Vohnehasnyi zasib*. Patent Ukrainy No. 136533 (2019). Published August 27, 2019.
15. Kutsenko, M. A., Yelagin, H. I., Alekseieva, O. S., Yushchuk, V., Nakonechnyi, V. V., & Zaika, P. I. (2019). Tekhniko-ekonomichne obgruntuvannia orhanizatsii vyhotovlennia zasobiv dlia hasinnia pozhezh horiuchykh ridyn na osnovi vohnehasnykh solei, immobilizovanykh porystym nosiiem. *Nadzvychni situatsii: Poperedzhennia ta likvidatsiia*, 3(1), 42–50.
16. *Sposib vyznachennia porystosti podribnenykh dribnoporystykh materialiv*. Zaiavka na vynakhid Ukrainy No. a202201522. Registered May 11, 2022.

PHYSICOCHEMICAL MECHANISM OF EXTINGUISHING FIRES ON THE SURFACE OF WATER BODIES USING AGENTS BASED ON HIGHLY POROUS WOOD SAWDUST

M. Kutsenko, G. Yelagin, O. Nuianzin, A. Alyeksyeyev, N. Havrylenko, D. Kryshstal

National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine

KEYWORDS:

fire suppression, crude oil, flammable liquid, maritime transportation, fire-extinguishing agents, immobilization, buoyancy, pyrolysis, inhibition.

ABSTRACT

The article investigates the physicochemical mechanism of extinguishing oil and petroleum product spill fires on water surfaces using agents based on highly porous wood sawdust immobilized with ammonium and diammonium phosphates. The relevance of the topic is driven by the increasing frequency of tanker accidents and the risk of large-scale fires in marine areas, where traditional extinguishing methods are often ineffective or environmentally hazardous. The object of the study is the process of suppressing flammable liquids on the water surface using immobilized pine sawdust. The aim of the work was to identify the primary factors determining the agent's effectiveness and to clarify the combustion inhibition mechanism. The study examines the material's porosity and buoyancy relative to salt content, as well as the processes of carrier pyrolysis and desorption of fire-extinguishing components at temperatures of 400–600°C. It was established that buoyancy is maintained at salt concentrations up to 0.7–0.8 g per 1 g of sawdust, ensuring the agent remains within the combustion zone. The results show that 77–85% of phosphorus-containing components are released at 400°C, and are utilized almost completely at 600–800°C. An explanation of the extinguishing mechanism is proposed, consisting of the interaction between active flame radicals and phosphate compound molecules, leading to the formation of less reactive complexes. The scientific novelty lies in providing theoretical evidence for this topochemical mechanism of combustion inhibition by phosphate salts and a comprehensive justification of how buoyancy, desorption, and the inhibition of free-radical chain reactions affect the agent's efficiency. The findings define directions for further material improvement, specifically enhancing its long-term buoyancy.

УДК 624.042.8:624.012.45:614.8

ПАРАМЕТРИЧНЕ ОБЧИСЛЮВАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПІСЛЯАВАРІЙНОГО СТАНУ ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ КАРКАСНОЇ БУДІВЛІ ПІСЛЯ ЛОКАЛЬНОГО ДИНАМІЧНОГО ВПЛИВУ

DOI: 10.52363/2518-1777-2026-21-7

Томенко В. І¹., ORCID iD 0000-0001-7139-9141
Томенко М. Г²., ORCID iD 0000-0002-2354-9106
Мельник Р. П¹., ORCID iD 0000-0002-5622-5642
Мельник О. Г¹., ORCID iD 0000-0002-9671-108X
*E-mail: melnyk.olja.2014@gmail.com

¹Національний університет цивільного захисту України, Україна

²Київський науково-дослідний інститут судових експертиз, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції:

10.05.2026

Прийнято: 01.05.2026

Опубліковано:

30.05.2026

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

залізобетонна каркасна будівля; локальний динамічний вплив; імпульсне навантаження; обчислювальний експеримент; інтегральне пошкодження; залишкова несуча здатність; оперативна надійність; небезпечні ділянки; цивільний захист.

АНОТАЦІЯ

У статті наведено результати параметричного обчислювального дослідження післяаварійного стану залізобетонної каркасної будівлі після локального динамічного імпульсного впливу. Актуальність роботи зумовлена потребою оперативного визначення залишкової несучої здатності будівель, що зазнали локального ударно-вибухового пошкодження, та обґрунтування рішень щодо безпечного доступу особового складу під час аварійно-рятувальних робіт. Метою дослідження є встановлення закономірностей зміни післяаварійного стану просторової залізобетонної каркасної будівлі залежно від параметрів локального динамічного імпульсу та локалізація небезпечних ділянок у пошкодженій несучій системі. У роботі застосовано прямий нелінійний динамічний аналіз, параметричне моделювання п'яти сценаріїв впливу та редукцію фізико-механічних характеристик матеріалів у пошкоджених зонах. Для кількісної оцінки наслідків використано інтегральний показник конструктивного пошкодження, коефіцієнт залишкової несучої здатності, індекс структурної живучості та індекс оперативної надійності. Установлено, що зі зростанням інтенсивності локального імпульсу інтегральне пошкодження зростає від 0,12 до 0,74, коефіцієнт залишкової несучої здатності зменшується від 0,93 до 0,29, а індекс оперативної надійності — від 0,72 до 0,01. Показано, що найбільш небезпечні зони концентруються на нижніх поверхах у районі прикладання імпульсу та у вертикальному ланцюгу елементів над пошкодженою ділянкою. Наукова новизна полягає у поєднанні параметрів локального динамічного впливу з інтегральними показниками післяаварійної працездатності та просторовою картою небезпечних ділянок. Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів для планування маршрутів доступу, визначення місць тимчасового підсилення та вибору безпечної тактики пошуково-рятувальних робіт.

Постановка проблеми. Унаслідок локального динамічного ударно-вибухового впливу будівля або окремі її конструктивні елементи можуть втрачати несучу здатність, що супроводжується зміною просторової роботи конструктивної системи та створює ризик розвитку прогресуючого обвалення. Для системи

цивільного захисту це має принципове значення, оскільки в післяаварійній ситуації необхідно не лише встановити факт руйнування конструкцій, а й у стислі терміни визначити, чи зберігає будівля залишкову надійність, які її ділянки є найбільш небезпечними та чи можливе безпечне перебування людей і

рятувальників у межах пошкодженої споруди.

Особливу небезпеку становить вторинне руйнування конструкцій, яке може виникати вже після завершення первинного локального впливу. На практиці це означає, що будівля, яка зовні частково зберегла геометричну цілісність, може фактично перебувати у стані прихованої нестійкості через локальне зниження жорсткості елементів, пошкодження вузлів, втрату сумісної роботи бетону й арматури або перерозподіл зусиль на елементи, які не були розраховані на відповідне додаткове навантаження. За таких умов візуального огляду недостатньо, а спрощені інженерні висновки без кількісного обґрунтування можуть призвести до помилкових рішень щодо організації пошуково-рятувальних робіт [10–12].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика прогресуючого обвалення, живучості будівель та оцінювання їхнього післяаварійного технічного стану посідає важливе місце у міжнародних та вітчизняних дослідженнях у галузі будівельної механіки, захисного будівництва та цивільного захисту. Нормативною основою моделювання залізобетонних елементів є положення Eurocode 2 [1], а для опису екстремальних вибухових дій широко використовуються рекомендації UFC 3-340-02 [2] та класичні положення щодо імпульсних навантажень, наведені у роботі [3].

У документах GSA [4, 5] і рекомендаціях NIST [6] систематизовано непрямі та прямі підходи до зменшення ризику прогресуючого обвалення. Перевагою цих документів є чітка логіка перевірки альтернативного шляху передавання навантаження, однак вони переважно орієнтовані на оцінювання стійкості системи після умовного вилучення елементів і меншою мірою враховують реальну деградацію матеріалів та локальне зниження жорсткості у пошкоджених зонах.

Процедури FEMA P-2055 [7] та ATC-20 [8] призначені для оперативного

інженерного оцінювання пошкоджених будівель після небезпечної події. Їх сильним боком є можливість швидко приймати рішення щодо доступу до споруди, проте основою таких процедур здебільшого залишаються результати візуального огляду та експертного судження, а не просторовий обчислювальний аналіз залишкової несучої здатності й зон вторинної небезпеки.

У науковій роботі [9] запропоновано схему швидкої оцінки пошкодження регулярних залізобетонних рам під дією зовнішніх вибухів із використанням обмеженої кількості найбільш інформативних параметрів. Для українського наукового контексту вагомими є дослідження [10; 11], у яких обґрунтовано необхідність нелінійного розрахунку після локального руйнування та показано роль зміненої розрахункової схеми в розвитку прогресуючого обвалення.

У науковій роботі [12] систематизовано причини непропорційного руйнування залізобетонних будівель за стадіями проектування, будівництва та експлуатації, а у наукових роботах [13; 14] розкрито підходи до аналізу стійкості конструкцій за екстремальних динамічних впливів і запобігання прогресуючому обваленню за рахунок конструктивних заходів. Водночас у зазначених наукових роботах не сформовано єдиної процедури, яка б поєднувала локальну деградацію матеріалів, інтегральне післяаварійне оцінювання та просторове зонування небезпечних ділянок для потреб цивільного захисту.

Отже, не вирішеною частиною проблеми залишається встановлення закономірностей зміни інтегральних показників пошкодження та післяаварійної надійності будівлі залежно від параметрів локального динамічного імпульсу, а також перехід від результатів прямого нелінійного обчислювального аналізу до просторової карти небезпечних ділянок, придатної для підтримки рішень у системі цивільного захисту.

Формулювання цілей дослідження. Метою роботи є встановлення закономірностей зміни

післяаварійного стану залізобетонної каркасної будівлі та просторового розподілу небезпечних ділянок залежно від параметрів локального динамічного імпульсного впливу.

Для досягнення поставленої мети розв'язано такі завдання:

- 1) сформовано параметричну розрахункову модель будівлі з урахуванням просторової роботи несучої системи;
- 2) задано серію сценаріїв локального імпульсного впливу з варіюванням пікового тиску, тривалості позитивної фази та площі прикладання;
- 3) визначено інтегральні показники пошкодження, залишкової несучої здатності, структурної живучості та оперативної надійності;
- 4) проаналізовано зміну зазначених показників залежно від інтенсивності впливу та побудовано карту небезпечних ділянок будівлі.

Матеріали та методи дослідження.

Для дослідження прийнято регулярну дев'ятиповерхову залізобетонну каркасну будівлю прямокутної форми в плані розмірами 24 × 18 м. Просторова схема включала чотири кроки колон у поздовжньому напрямку та три кроки у поперечному. Висота типового поверху становила 3,3 м. Несучу систему моделювали колонами, ригелями та плитами перекриття з урахуванням просторової сумісної роботи; у центральній частині передбачали діафрагму жорсткості, а перекриття розглядали як жорсткі диски в площині поверху [1].

Для бетону приймали клас С30/37 із модулем пружності 30 ГПа, розрахунковою міцністю на стиск 30 МПа та розтяг 2,9 МПа. Для арматури використовували клас А500 з модулем пружності 200 ГПа та межею текучості 500 МПа. На початковому етапі визначали напружено-деформований стан будівлі від власної ваги, тривалих навантажень і нормативного експлуатаційного навантаження на перекриття.

Локальний аварійний вплив задавали у вигляді узагальненого імпульсного

навантаження. Для опису позитивної фази використовували функцію Ф. Г. Фрідлендера [2; 3], а реакцію конструктивної системи визначали на основі прямого нелінійного динамічного аналізу з урахуванням фізичної та геометричної нелінійності. Для кількісної оцінки наслідків використовували інтегральний показник конструктивного пошкодження D , коефіцієнт залишкової несучої здатності R_{res} , індекс структурної живучості Ω_s та індекс оперативної надійності R_{op} .

Аварійний вплив у межах методу задається як узагальнене динамічне імпульсне навантаження

$$P(t) = P_{\max} \varphi(t), \quad (1)$$

де $P_{\max}$ - максимальна інтенсивність навантаження; $\varphi(t)$ - функція форми імпульсу.

Для опису позитивної фази імпульсу використовується рівняння Ф. Г. Фрідлендера

$$P(t) = P_s \left(1 - \frac{t}{t_d}\right) e^{-bt/t_d}, \quad (2)$$

де P_s - піковий надлишковий тиск; t_d - тривалість позитивної фази; b - параметр форми імпульсу.

Інтегральний імпульс навантаження визначається як

$$J = \int_0^{t_d} P(t) dt. \quad (3)$$

Узагальнений вектор параметрів динамічного впливу має вигляд

$$I_{dyn} = \{P_s, t_d, J, A_{loc}, \eta_{dir}, \eta_{imp}\}, \quad (4)$$

де A_{loc} - площа локального прикладання; η_{dir} - коефіцієнт напрямленості; η_{imp} - коефіцієнт супутньої ударної складової.

Реакція конструктивної системи визначається на основі прямого нелінійного динамічного аналізу:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + R(u, t) = F_{st} + F_{imp}(t), \quad (5)$$

де M - матриця мас; C - матриця демпфування; $R(u,t)$ - нелінійний вектор внутрішніх сил; F_{st} - вектор штатних навантажень; $F_{imp}(t)$ - вектор аварійного впливу.

Така постановка дає змогу врахувати часовий розвиток переміщень, інерційні ефекти, фізичну та геометричну нелінійність, а також зміну розрахункової схеми після локального пошкодження.

Для оцінювання локального матеріального пошкодження бетону та арматури вводиться індекс

$$D_{m,i} = \max \left(\frac{\varepsilon_{c,i}}{\varepsilon_{c,lim}}, \frac{\varepsilon_{ct,i}}{\varepsilon_{ct,lim}}, \frac{\varepsilon_{s,i}}{\varepsilon_{s,lim}}, \frac{\sigma_{c,i}}{f_{c,0}}, \frac{\sigma_{s,i}}{f_{y,0}} \right), \quad (6)$$

де $\varepsilon_{c,i}$, $\varepsilon_{ct,i}$, $\varepsilon_{s,i}$ - фактичні деформації бетону та арматури; $\sigma_{c,i}$, $\sigma_{s,i}$ - відповідні напруження.

Цей показник дозволяє перейти від якісного опису руйнування до кількісного визначення ступеня локальної деградації матеріалу.

Для бетону в пошкодженій зоні залишкові характеристики задаються як

$$E_{c,res,i} = (1 - d_{c,i})E_{c,0}, \quad (7)$$

$$f_{c,res,i} = (1 - d_{c,i})f_{c,0}, \quad (8)$$

$$f_{ct,res,i} = (1 - d_{t,i})f_{ct,0}, \quad (9)$$

де $d_{c,i}$ - коефіцієнт деградації стиснутої зони; $d_{t,i}$ - коефіцієнт деградації розтягнутої зони.

Для арматури приймається

$$E_{s,res,i} = (1 - d_{s,i})E_{s,0}, \quad (10)$$

$$f_{y,res,i} = (1 - d_{s,i})f_{y,0}. \quad (11)$$

На відміну від умовного повного вилучення елементів, такий редуційний підхід дає змогу реалістичніше моделювати післяаварійний стан конструктивної системи.

Для оцінювання конструктивного пошкодження елемента застосовуємо індекс

$$D_i = \max \left(\frac{M_i}{M_{lim,i}}, \frac{N_i}{N_{lim,i}}, \frac{Q_i}{Q_{lim,i}}, \frac{u_i}{u_{lim,i}}, D_{m,i} \right), \quad (12)$$

де M_i , N_i , Q_i - поточні зусилля; $M_{lim,i}$, $N_{lim,i}$, $Q_{lim,i}$ - граничні значення; u_i - переміщення; $u_{lim,i}$ - граничні переміщення [3-4].

Інтегральний показник конструктивного пошкодження будівлі визначається як

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n w_i D_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \quad (13)$$

де w_i - вагові коефіцієнти конструктивної значущості.

Урахування w_i дає можливість пов'язати математичну модель із тими слабкими місцями будівель, які виділено у статті про причини прогресуючого обвалення, зокрема критичними колонами, слабкими вузлами та конструктивними диспропорціями [11].

Після формування післяаварійної моделі залишкова несуча здатність визначається як

$$R_{res} = \frac{F_{ult,d}}{F_{ult,0}}, \quad (14)$$

де $F_{ult,0}$ - граничне навантаження для непошкодженої моделі; $F_{ult,d}$ - граничне навантаження для пошкодженої моделі.

Коефіцієнт післяаварійної стійкості записується так:

$$\Psi = \frac{R_{res}}{R_{req}}, \quad (15)$$

де R_{req} - необхідна несуча здатність для сприйняття нормативних навантажень.

Індекс структурної живучості визначається формулою

$$\Omega_s = \frac{R_{res}}{R_0} \cdot \frac{1}{1 + \Lambda} \cdot \Psi, \quad (16)$$

де R_0 - початкова несуча здатність будівлі; Λ - коефіцієнт локалізації пошкодження.

Для оперативного практичного використання вводиться індекс оперативної надійності

$$R_{op} = R_{res}(1 - D)\Omega_s, \quad (17)$$

який дозволяє перевести результати складного чисельного аналізу у форму, придатну для швидкого інженерного висновку щодо ступеня надійності пошкодженої будівлі.

На відміну від відомих робіт [10-13], він дозволяє перевести результати складного чисельного аналізу у форму, придатну для швидкого інженерного висновку про ступінь надійності пошкодженої будівлі.

Для просторової локалізації небезпечних зон пропонується індекс небезпечності елемента

$$H_i = aD_i + \beta(1 - \alpha_i) + \gamma w_i, \quad (18)$$

де H_i - індекс небезпечності ділянки; α_i - коефіцієнт збереження жорсткості; w_i - конструктивна значущість; α , β , γ - вагові коефіцієнти.

Виклад основного матеріалу. Для перевірки працездатності запропонованого підходу виконано контрольний параметричний обчислювальний експеримент на модельній просторовій

залізобетонній будівлі каркасного типу. Постановка експерименту була спрямована на оцінювання зміни післяаварійного стану будівлі залежно від інтенсивності локального динамічного імпульсного впливу та на встановлення зв'язку між параметрами цього впливу, рівнем пошкодження конструктивної системи, залишковою несучою здатністю і просторовим розподілом небезпечних ділянок.

Параметри контрольного експерименту наведено в табл. 1. П'ять сценаріїв відрізнялися піковим тиском, тривалістю позитивної фази та площею локального прикладання. Таке параметричне задання було вибрано з метою забезпечення універсальності підходу й можливості аналізувати не конкретний тип ураження, а загальні закономірності реакції будівлі на локальний короточасний динамічний вплив

Таблиця 1 – Параметри контрольного обчислювального експерименту

Сценарій	Піковий тиск P_s , кПа	Тривалість t_d , мс	Площа A_{loc} , м ²	Характеристика сценарію
S1	35	12	4	низький локальний вплив
S2	70	8	4	помірний локальний вплив
S3	120	6	6	підвищений локальний вплив
S4	180	4	6	інтенсивний локальний вплив
S5	240	3	8	гранично інтенсивний локальний вплив

Джерело: розроблено авторами

У часовій області вплив описували функцією Ф. Г. Фрідлендера [2; 3], яка дає змогу коректно відтворити позитивну фазу імпульсного навантаження. Для кожного сценарію задавали значення пікового тиску та тривалості позитивної фази, після чого обчислювали інтегральний імпульс навантаження. Таким чином, у межах

експерименту варіювали не лише максимальну інтенсивність дії, а й її інтегральний ефект, що дало змогу простежити поведінку будівлі в ширшому параметричному просторі.

Після задання вихідних параметрів для кожного сценарію виконувався прямий нелінійний динамічний розрахунок

конструктивної системи в часовій області. У результаті такого розрахунку визначалися максимальні переміщення вузлів, зусилля у критичних елементах, локальні деформації бетону та арматури, а також ступінь перевищення граничних станів за міцністю, жорсткістю і деформативністю. Для переходу до післяаварійного оцінювання для пошкоджених елементів формувалася модифікована розрахункова модель, у якій фізико-механічні характеристики матеріалів редукувалися відповідно до рівня локального пошкодження.

Першим етапом аналізу була оцінка інтегрального показника пошкодження будівлі D залежно від пікового тиску динамічного впливу. Встановлено, що зі зростанням пікового тиску спостерігається стійка тенденція до збільшення інтегрального пошкодження конструктивної системи. При переході від сценарію S1 до сценарію S5 значення показника D зростає від 0.12 до 0.74, тобто більш ніж у шість разів. Характер кривої свідчить, що на початковому етапі зростання пошкодження є відносно плавним, однак після досягнення певного рівня інтенсивності впливу спостерігається прискорення деградації системи.

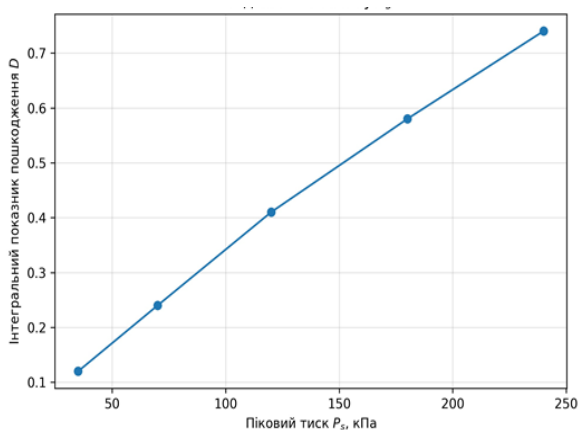


Рисунок 1 – Залежність інтегрального показника пошкодження D від пікового тиску P_s

Другим етапом аналізу було дослідження зміни коефіцієнта залишкової несучої здатності R_{res} та індексу

оперативної надійності R_{op} залежно від імпульсу навантаження J . Отримані залежності демонструють, що зі зростанням імпульсу обидва показники зменшуються, однак швидкість їх зниження є різною. Коефіцієнт залишкової несучої здатності відображає здатність пошкодженої будівлі сприймати нормативне навантаження порівняно з непошкодженим станом, тоді як індекс оперативної надійності додатково враховує інтегральний рівень пошкодження та структурну живучість системи.

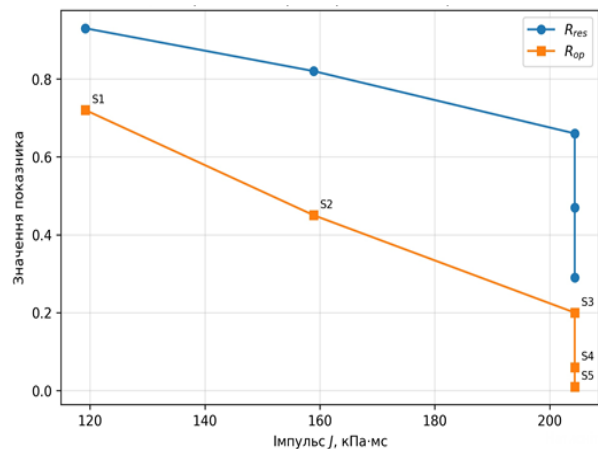


Рисунок 2 – Залежність коефіцієнта залишкової несучої здатності R_{res} та індексу оперативної надійності R_{op} від імпульсу J

Третім етапом аналізу стало просторове дослідження небезпечності конструктивних зон за сценарієм S4, який було прийнято як репрезентативний приклад інтенсивного локального динамічного впливу. Аналіз карти свідчить, що найбільш небезпечними є нижні поверхи будівлі в зоні безпосереднього прикладання аварійного впливу, а також вертикальний ланцюг елементів над пошкодженою ділянкою. Саме тут формуються максимальні значення індексу небезпечності, що обумовлено поєднанням кількох факторів: високого рівня локального пошкодження, значної втрати жорсткості та високої конструктивної значущості відповідних елементів у просторовій системі.

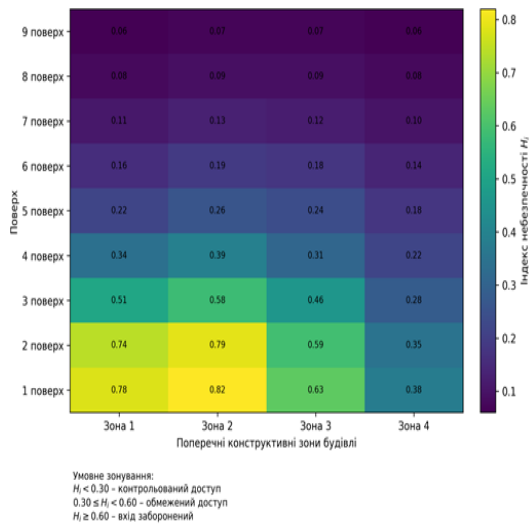


Рисунок 3 – Просторова карта небезпечних ділянок будівлі для сценарію S4

Карта небезпечних ділянок може використовуватися не лише як ілюстративний матеріал, а як практичний інструмент просторової класифікації післяаварійного стану будівлі. На її основі можна формувати маршрути доступу до осередків пошуку, визначати місця потенційного встановлення тимчасових підпор, а також попередньо оцінювати доцільність входу в окремі функціональні зони будівлі. Для завершення інтерпретації

результатів доцільно співвіднести їх із блок-схемою прийняття рішень.

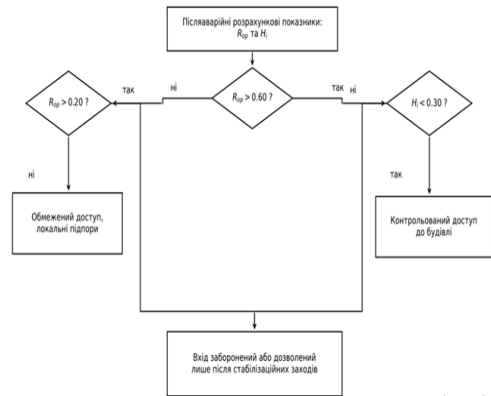


Рисунок 4 – Блок-схема прийняття рішень для пошуково-рятувальних робіт на основі індексу оперативної надійності R_{op} та індексу небезпечності H_i

Узагальнені результати контрольного обчислювального експерименту наведено в табл. 2. Вони свідчать, що зі зростанням пікового тиску та зменшенням тривалості позитивної фази збільшується локальна інтенсивність пошкодження, що зумовлює швидке погіршення залишкової надійності будівлі.

Таблиця 2 – Результати контрольного обчислювального експерименту

Сценарій	Макс. переміщення, мм	D	R_{res}	Ω_s	R_{op}	Інженерна інтерпретація
S1	14	0,12	0,93	0,88	0,72	будівля придатна до контрольованого доступу
S2	28	0,24	0,82	0,73	0,45	обмежений доступ, локальні підпори
S3	47	0,41	0,66	0,51	0,20	високий ризик вторинного руйнування
S4	76	0,58	0,47	0,29	0,06	доступ лише для спеціальних аварійних робіт
S5	118	0,74	0,29	0,12	0,01	вхід заборонений, аварійний стан

Дані табл. 2 показують, що перехід від сценарію S1 до S3 супроводжується збільшенням максимального переміщення від 14 до 47 мм, зростанням інтегрального показника пошкодження D від 0,12 до 0,41 та зниженням індексу оперативної надійності R_{op} від 0,72 до 0,20. Це відповідає переходу від режиму контрольованого доступу до стану високого ризику вторинного руйнування. Найрізкіше погіршення спостерігається під

час переходу від S3 до S4: максимальне переміщення зростає на 61,7 %, інтегральне пошкодження – на 41,5 %, коефіцієнт залишкової несучої здатності знижується від 0,66 до 0,47, а індекс оперативної надійності - від 0,20 до 0,06, тобто на 70,0 %.

Узгодження результатів таблиці 2 з блок-схемою на рисунку 4 свідчить, що для сценаріїв S1–S2 доцільним є режим контрольованого або обмеженого доступу з

локальним підсиленням, тоді як для сценаріїв S4–S5 рівень післяаварійної надійності є критично низьким і потребує заборони входу або виконання спеціальних стабілізаційних заходів. Отже, індекс оперативної надійності R_{op} може бути використаний як узагальнений критерій інженерної класифікації стану пошкодженого об'єкта, а карта небезпечних ділянок - як основа для вибору маршрутів доступу та місць установавання тимчасових підпор.

Висновки та напрями подальших досліджень. 1. Виконане обчислювальне дослідження показало, що післяаварійний стан просторової залізобетонної каркасної будівлі істотно залежить від пікового тиску, тривалості позитивної фази та площі локального прикладання імпульсного навантаження. Для сценаріїв S1–S5 максимальні переміщення зросли від 14 до 118 мм, тобто у 8,4 разів.

2. Установлено нелінійне зростання інтегрального показника пошкодження D зі збільшенням інтенсивності локального впливу: від 0,12 для сценарію S1 до 0,74 для сценарію S5, тобто у 6,2 разів. Це відповідає переходу від локального

пошкодження до системної втрати жорсткості окремих елементів і зон будівлі.

3. Показано, що зі зростанням імпульсу навантаження коефіцієнт залишкової несучої здатності R_{res} зменшується від 0,93 до 0,29, тобто на 68,8 %, а індекс оперативної надійності R_{op} – від 0,72 до 0,01, тобто на 98,6 %. Отже, саме R_{op} є чутливішим до погіршення технічного стану і може бути використаний як узагальнений критерій допустимості доступу до пошкодженого об'єкта.

4. Просторовий аналіз за сценарієм S4 засвідчив, що найбільш небезпечні ділянки концентруються на нижніх поверхах у зоні безпосереднього прикладання аварійного впливу та у вертикальному ланцюгу елементів над нею. Це підтверджує доцільність використання карти небезпечних ділянок для планування маршрутів доступу, розміщення тимчасових підпор і вибору безпечної тактики пошуково-рятувальних робіт.

5. Перспективи подальших досліджень пов'язані з урахуванням будівель з нерегулярною конструктивною схемою, багатофакторних аварійних впливів та з експериментальною валідацією запропонованого підходу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. EN 1992-1-1:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels : CEN, 2004. 227 p.
2. UFC 3-340-02. Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions. Washington, DC : Department of Defense, 2008.
3. Smith, P., & Hetherington, J. (1994). *Blast and Ballistic Loading of Structures* (1st ed.). Oxford : Butterworth-Heinemann. 336 p.
4. Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects. Washington, DC : U.S. General Services Administration, 2003. 119 p.
5. Alternate Path Analysis and Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance. Washington, DC : U.S. General Services Administration, 2016. 203 p.
6. Ellingwood B. R., Smilowitz R., Dusenberry D. O., Duthinh D., Lew H. S., Carino N. J. Best Practices for Reducing the Potential for Progressive Collapse in Buildings. Gaithersburg, MD : National Institute of Standards and Technology, 2007. 216 p.
7. FEMA P-2055. Post-disaster Building Safety Evaluation Guidance. Washington, DC : FEMA, 2019. 228 p.
8. ATC-20. Procedures for Postearthquake Safety Evaluation of Buildings. Redwood City, CA : Applied Technology Council, 1989. 152 p.
9. Li, R., Yu, J., & Zhou, X. (2024). A rapid damage assessment framework for regular reinforced concrete frame structures under external explosions. *Structures*. Vol. 68. Article 107104.
10. Отрош Ю., Майборода Р., Рашкевич Н., Ромін А. Дослідження методик розрахунку прогресуючого обвалення. *Механіка та математичні методи*. 2023. Вип. 2. С. 25–40.
11. Майборода Р., Отрош Ю. Дослідження методики розрахунку стійкості до прогресуючого обвалення будівель внаслідок пожежі та вибуху. *Комунальне господарство міст*. 2025. Т. 3, вип. 191. С. 485–495.
12. Майборода Р., Отрош Ю., Черпаха Р. Основні причини прогресуючого обвалення залізобетонних будівель. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист* : матеріали XIV Всеукр. наук.-практ. конф. з міжнародною участю, м. Черкаси, 24–25 жовтня 2024. Черкаси, 2024. С. 52–54.
13. Skob Y., Dreval Y., Vasilchenko A., Maiboroda R. Selection of Material and Thickness of the Protective Wall in the Conditions of a Hydrogen Explosion of Various Power. *Key Engineering Materials*. 2023. Vol. 952. P. 121–129.
14. Maiboroda R., Zhuravskij M., Otrosh Y., Karpuntsov V. Determination of the Required Area of Easily Removable Structures to Protect against Progressive Collapse. *Key Engineering Materials*. 2024. Vol. 1004. P. 73–83.

REFERENCES

1. European Committee for Standardization. (2004). Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings (EN 1992-1-1:2004).
2. Department of Defense. (2008). UFC 3-340-02: Structures to resist the effects of accidental explosions.
3. Smith, P., & Hetherington, J. (1994). *Blast and Ballistic Loading of Structures* (1st ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann. 336 p. <https://doi.org/10.1201/9781482269277>.
4. U.S. General Services Administration. (2003). Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects.
5. U.S. General Services Administration. (2016). Alternate path analysis and design guidelines for progressive collapse resistance.
6. Ellingwood, B. R., Smilowitz, R., Dusenberry, D. O., Duthinh, D., Lew, H. S., & Carino, N. J. (2007). Best practices for reducing the potential for progressive collapse in buildings (NISTIR 7396). National Institute of Standards and Technology. <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.7396>.
7. Federal Emergency Management Agency. (2019). FEMA P-2055: Post-disaster building safety evaluation guidance.
8. Applied Technology Council. (1989). ATC-20: Procedures for postearthquake safety evaluation of buildings.
9. Li, R., Yu, J., & Zhou, X. (2024). *A rapid damage assessment framework for regular reinforced concrete frame structures under external explosions*. Structures. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107104>.
10. Otrosh, Yu., Maiboroda, R., Rashkevich, N., & Romin, A. (2023). Doslidzhennia metodyk rozrakhunku prohresuiuchoho obvalennia [Study of methods for progressive collapse analysis]. *Mekhanika ta matematychni metody*, 2, 25–40. <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2023-5-2-25-40>.
11. Maiboroda, R., & Otrosh, Yu. (2025). Doslidzhennia metodyky rozrakhunku stiikosti do prohresuiuchoho obvalennia budivel vnaslidok pozhezhi ta vybukhu [Study of the methodology for calculating resistance to progressive collapse of buildings caused by fire and explosion]. *Komunalne hospodarstvo mist*, 3 (191), 485–495. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-3-191-485-495>.
12. Maiboroda, R., Otrosh, Yu., & Cherepakha, R. (2024). Osnovni prychny prohresuiuchoho obvalennia zalizobetonnykh budivel [Main causes of progressive collapse of reinforced concrete buildings]. *Nadzvychnai sytuatsii: bezpeka ta zakhyst*, materialy XIV Vseukrainskoi nauko-vo-praktychnoi konferentsii z mizhnarodnoiu uchastiu [Emergencies: Safety and Protection].
13. Skob, Y., Dreval, Y., Vasilchenko, A., & Maiboroda, R. (2023). Selection of Material and Thickness of the Protective Wall in the Conditions of a Hydrogen Explosion of Various Power. *Key Engineering Materials*, 952, 121–129. <https://doi.org/10.4028/p-ST1VeT>.
14. Maiboroda, R., Zhuravskij, M., Otrosh, Y., & Karpuntsov, V. (2024). Determination of the Required Area of Easily Removable Structures to Protect Against Progressive Collapse. *Key Engineering Materials*, 1004, 73–83. <https://doi.org/10.4028/p-V0xA6H>.

PARAMETRIC COMPUTATIONAL STUDY OF THE POST-ACCIDENT STATE OF A REINFORCED CONCRETE FRAME BUILDING AFTER LOCAL DYNAMIC IMPACT

V. Tomenko, M. Tomenko, R. Melnyk, O. Melnyk

¹National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine

²Kyiv Scientific Research Institute of Forensic Expertise, Ukraine

KEYWORDS: ABSTRACT

reinforced
concrete frame
building; local
dynamic
impact;
impulsive load;
computational
experiment;
integral
damage;
residual load-
bearing
capacity;
operational
reliability;
hazardous
zones; civil
protection

The article presents the results of a parametric computational study of the post-accident state of a reinforced concrete frame building after a local dynamic impulsive impact. The relevance of the study is determined by the need for rapid and quantitatively justified decisions on access to damaged buildings during search and rescue operations after local blast-type actions. The purpose of the research is to establish patterns of change in the post-accident state of a spatial reinforced concrete frame building depending on the parameters of a local dynamic impulse and to identify hazardous zones in the damaged structural system. The study is based on a direct nonlinear dynamic analysis of a nine-storey building with a regular structural scheme, parametric modelling of five loading scenarios, and reduction of concrete and reinforcement properties in damaged zones. The consequences of the impact are assessed by means of an integral structural damage index, a residual load-bearing capacity coefficient, a structural survivability index, and an operational reliability index. The computational experiment demonstrated a nonlinear deterioration of the structural condition as the impulse intensity increased: the integral damage index grew from 0.12 to 0.74, the residual load-bearing capacity coefficient decreased from 0.93 to 0.29, and the operational reliability index decreased from 0.72 to 0.01. The most severe degradation was observed when the building passed from scenario S3 to S4, which corresponds to the transition from a state of high secondary-failure risk to a critically hazardous state requiring special emergency measures. The spatial analysis showed that the most hazardous zones are concentrated at the lower storeys near the impulse application area and along the vertical chain of elements above the damaged region. The scientific novelty of the work lies in combining local impulse parameters with integral indicators of post-accident performance and a spatial hazard map. The practical value of the study consists in the possibility of using the obtained results to plan access routes, identify locations for temporary strengthening, and substantiate safe search-and-rescue tactics in the civil protection system.

УДК 614.84:621.35

ПРОЦЕСИ ПРИПИНЕННЯ САМОНАГРІВАННЯ ПОШКОДЖЕНИХ ЛІТІЙ-ІОННИХ АКУМУЛЯТОРІВ ПОДАВАННЯМ ВОДИ

DOI: 10.52363/2518-1777-2026-21-8

Трегубов Д. Г., ORCID iD 0000-0003-1821-822X

Майборода А. О., ORCID iD 0000-0001-6108-9772

Турбін Є. А., ORCID iD 0009-0005-4777-0269

Нуянзін В. М., ORCID iD 0000-0003-4785-0814

Журбинський Д. А., ORCID iD 0009-0004-5652-4177

*E-mail: trehubov_dmytro@nuczu.edu.ua

Національний університет цивільного захисту України, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції:

21.02.2026

Прийнято: 21.04.2026

Опубліковано:

30.05.2026

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

літій-іонний акумулятор, механічне пошкодження, самонагрівання, тепловий розгін, пожежогасіння, вода, охолодження, витрата, кислотність.

АНОТАЦІЯ

Об'єктом дослідження є аналіз побудови, принципів роботи та механізмів теплового розгону літій-іонних акумуляторів; увага зосереджена на їх перевагах та недоліках, матеріалах розчинників та електродів, що використовуються, складі газової фази електродних реакцій та особливостях пожежної небезпеки. Узагальнено перебіг процесів, що спостерігаються на основних стадіях теплового розгону акумуляторів. Розроблено методологію та зібрано установку для дослідження процесів теплового розгону пошкодженого акумулятора та його гасіння. Визначено типові зовнішні механічні пошкодження акумулятора, що призводять до неконтрольованого теплового розгону. Відповідність температурного режиму процесу самонагрівання акумулятора стадіям теплового розгону визначається на основі даних вимірювання температури та візуальних спостережень. Розглянуто набір можливих хімічних реакцій, що викликають інтенсивне самонагрівання, подальше розкладання матеріалів та деформацію акумулятора. Припинення самонагрівання досліджували шляхом занурення акумулятора в ємність з надлишком води відносно стехіометричної кількості для максимальної маси металевого літію, яка може накопичуватися під час роботи акумулятора. Виділення газів реєстрували візуально, а у складі визначали водень. Вимірювали зміну кислотності отриманого водного розчину під час гасіння шляхом охолодження водою в надлишку. Встановлено залежності часу завершення реакції з водою для досліджуваного механічного пошкодження. Розраховано кількість води, необхідну для поглинання тепла, яке може виділятися під час реакцій; отримане значення корелює з експериментальними даними. Розглянуто можливі заходи щодо запобігання та зупинки горіння літій-іонних акумуляторів. Планується повторити поточну схему дослідження теплового розгону літій-іонного акумулятора, але не через механічне пошкодження, а за умов підвищеної температури навколишнього середовища та поганого теплообміну із зовнішнім простором.

Постановка проблеми. Сучасна концепція розвитку технічних пристроїв, вимоги до їх автономності та стабільності роботи, для можливості накопичення енергії періодичних процесів в електроенергетиці привели до широкого використання акумуляторних систем.

Вимоги до цих систем включають легкість, компактність, ефективність, пожежну, хімічну та екологічну безпеку. Найбільш ефективними та розвинутими є технології літій-іонних акумуляторів, але їх недолік – схильність до теплового розгону (самонагрівання) з ініціюванням пожежі.

Світова статистика фіксує займання таких акумуляторів під час використання та зберігання, що подекуди призводить до масштабних пожеж: у 2017 р. загорівся резервний акумулятор на електростанції біля Брюсселя з виділенням великої кількості токсичного диму [1]. У 2019 р. аномальне відкладення металевого літію в акумуляторі ініціювало його тепловий розгін та каскадну пожежу в системі акумуляування Arizona Public Service [2]; на момент прибуття рятувальників у приміщенні вже накопичилася горюча концентрація газів, що спричинило потужний вибух під час відкривання дверей. У 2024 р. кілька акумуляторів вибухнули на складі в Сеулі, загинуло 22 людини, знищено будівлі; того ж року на складі заводу SNAM (Франція) під час пожежі згоріло 900 т літєвих акумуляторів [3, 4].

Тому актуальними проблемами у даній технології є зниження ризику теплового розгону, розвиток систем охолодження акумуляторів у стаціонарних та аварійних режимах роботи, розвиток методології прогнозування можливості виникнення відповідних пожеж. Це передбачає вивчення варіантів теплового розгону окремих акумуляторів, випадків їх запалювання та розвитку масштабних пожеж. Дана робота зосереджена на аналізі стадій розвитку теплового розгону пошкодженого акумулятора та дослідженні умов ефективного гасіння під час його загоряння.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Явище теплового розгону відоме ще для лужних акумуляторів і виникає під час заряджання. За нештатних ситуацій, відсутності електроліту або його старіння, механічного пошкодження, перевищення зарядної напруги, заряджання після повної зарядки, поганих умов тепловоду – виникає підвищення температури електроліту та сили струму (через менше падіння напруги на акумуляторі), який посилюється до струму короткого замикання. Починаючи з певної сили струму виникає електроліз електроліту з виділенням водню і кисню. Кисень

поглинається кадмієвим катодом з окисненням і додатковим виділенням тепла. Підвищення температури посилює виділення газів [5], викликає роздуття акумулятора. Надалі або вибухає суміш газів [6], або починають реагувати матеріали, що контактують з перегрітим акумулятором. Водень може виділятися внаслідок пасивації кадмієвого катода. Процес протікає автокаталітично – самоприскорюється. Окремі типи літій-іонних акумуляторів мають підвищену схильність до теплового розгону, який може нагріти акумулятор до 600 °C.

Попит на Li досягає 1 млн т на рік і зростає [9], але порівняно з натрієм він є більш дефіцитною корисною копалиною. Широке використання Li зумовлене тим, що він має малий розмір атому, молярну масу, велику здатність віддавати електрони та схильність до асоціації в надмолекулярні структури, рухливість у формі іонів тощо. Li часто вводять у склад електролітів [7] та сцинтиляційних кристалів [8], електродів для неводних розчинників або у вакуумованих системах, як каталізатор полімеризації, для електропровідності, міцності і пластичності сплавів. Серед лужних металів іон Li має найбільший коефіцієнт поляризації і найменший – поляризованості. Ці властивості є корисними для зменшення розмірів і ваги акумулятора, швидкої зарядки.

Наразі основним джерелом автономного живлення є літій-іонні елементи з напругою 3,7–4,2 В, які, залежно від матеріалу анода (графіт на алюмінієвій фользі) і катода (на мідній фользі), існують у 2-х основних типах [10, 11, 12]: Li-NMC (літій-нікель-марганець-кобальт оксидний катод з вбудованими молекулами Li_2O) та LiFePO_4 (літій залізофосфатний катод) [13]. Кожна з цих систем має свої переваги і недоліки: обидві – мають графітовий анод; щільність енергії більша в NMC-акумуляторі – 0,2 проти 0,15 кВт·год/кг; він має плавне зниження напруги під час розряду, на відміну від LiFePO_4 -акумулятору; але виділяє кисень, містить токсичні матеріали, має більшу швидкість саморозряду – 4 проти 3 %/місяць, меншу

допустиму глибину розряду – 90 проти 100 % і кількість робочих циклів – 2500 проти 5000, меншу термічну стійкість до теплового розгону – 160 проти 250 °C.

Електроліти застосовують рідкі, гелеподібні, полімерні на основі солей Li у полярному розчиннику: перхлорат, фторид, тетрафтороборат або гексафторофосфат Li у середовищі карбонатів (вініл-, етилен-, пропілен-, диметил-, диетил-, метилетил-) [10, 11, 14]. Розчинники мають різні температури плавлення $t_{пл}$, кипіння $t_{кип}$, спалаху $t_{сп}$, густину, в'язкість та повинні мати високу діелектричну проникність, і є середовищем руху іонів Li. Діапазон працездатності акумулятора пов'язаний з $t_{пл}$ розчинника (37, 35, -50, -13, -14 °C для вказаних сполук; низька $t_{пл}$ пропіленкарбонату означає менші кластери [15]); $t_{кип}$ (243, 248, 240, 91, 126, 107 °C) визначає тиск пари, $t_{сп}$ (160, 160, 132, 17, 33, 27 °C) – легкість запалювання. Перші 3 розчинника є горючими рідинами – небезпечні за умов перегріву, останні 3 – легкозаймистими [16, 17, 18].

У зарядженому стані система має велику щільність енергії. Пошкодження акумулятора (прокол сепаратора голчастими дендритами літію, який за швидкої зарядки не встигає входити у структуру аноду; голчасті дефекти на мідній та алюмінієвій основах електродів) починає вивільняти цю енергію, що призводить до його розігріву, ініціює процеси випаровування або деструкції розчинника, виділення парів або газів, здуття і розриву батареї [19, 20].

Реакції з виділенням газів можуть відбуватися у приелектродних областях і в об'ємі електроліту: H_2 , CO , O_2 , CO_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_4H_{10} , POF_3 , C_2H_5F , PF_5 (H_2 + CO – 70% суміш). Газ, що утворюється є токсичними та вибухонебезпечними. У разі розгерметизації акумулятора можливе надходження кисню повітря до розігрітого Li, що активує відповідні реакції; волога повітря може змінювати напрямок реакцій. За умови контакту з графітом і перегріву може утворитися Li_2C_2 , який у присутності вологи реагує з виділенням H_2 [21].

Перегрітий акумулятор може викликати самозаймання або

самоспалахування присутніх горючих речовин [16, 21]. Для партії акумуляторів самонагрівання одного з них може спричинити ланцюговий процес самонагрівання для інших. Ця проблема є більш актуальною для вживаних батарей, доцільно їх розряджати перед складуванням, можливо відновити залишкову енергію.

Етапами розвитку аварійної ситуації є наступні [22]: пошкодження акумулятора за умов теплової, електричної або механічної дії; підвищення температури до 140 °C і тиску в системі; утворення та накопичення горючих газів електролізу, плавлення сепаратора за температур 110–160 °C; коротке замикання акумулятора з тепловим розгоном і стрімким зростанням температури до 850 °C з утворенням щільного диму; самоспалахування або зовнішнє запалювання газів електролізу, парів електроліту, газоподібних продуктів розкладання або прилеглих матеріалів. За температур близько 250 °C оксиди катоду вступають у реакції диспропорціювання з виділенням кисню. За температур > 600 °C карбон графітового аноду починає окиснюватися з виділенням теплоти [23]. У певний момент плавиться алюмінієва основа електрода. Під час горіння температура акумулятора може досягати 1000 °C. Об'єм газів, що виділяються, та їх нагрів викликає здуття та руйнування корпусу батареї з вивільненням та займанням цих газів. Енергія, що виділяється під час теплового розгону зарядженого акумулятора, може бути порівняна з тротиловим еквівалентом вибуху, наприклад, для акумулятора ноутбука це становить до 50 г.

Наукові розробки з підвищення безпеки акумуляторів мають напрями: розробка технологій, які усувають можливість теплового розгону; розробка систем швидкого моніторингу аварійної та пожежної небезпеки; розробка ефективних систем охолодження та гасіння пожеж акумуляторів. Більш простими методами моделювання теплового розгону є випробування на зовнішню теплову дію [24] та імітація зовнішнього механічного пошкодження, що в цій роботі є базовим напрямом.

Необхідно розрізняти режим горіння розчинника батареї від горіння металу за теплового розгону. Для 1-го сценарію підходять типові засоби гасіння пожеж класів А, В, С, а для пожежі металу всередині щільної конструкції ефективних методів гасіння немає [25]; стандартний засіб їх – порошок спеціального призначення, що плавиться від високої температури металу та утворює плівку, яка заважає доступу кисню повітря до поверхні або виходу парів металу у зону полум'я [21]. Але типова конструкція акумуляторів не дає можливості застосовувати цей метод, оскільки немає доступу порошку до поверхні, що горить. Можна також прийняти до уваги, що під час аргонодугового зварювання для захисту металу від окиснення подають аргон [26]. Але конструкції акумуляторів і на це не розраховані, тому Аг погано ізолює і не створює достатнє охолодження (CO_2 і N_2 підтримують горіння металів) [21, 27].

Достатнє теплопоглинання забезпечує вода [25], але водночас вона інтенсивно реагує з Li. Виходом з цієї ситуації для пожежогасіння є подавання води у значному надлишку для компенсації тепловиділення реакції Li з H_2O [28, 29]. Наразі розроблено потужні акумулятори з можливістю прокачування води крізь конструкцію для її охолодження за теплового розгону. Тобто, охолодження літій-іонного акумулятора водою під час теплового розгону залишається більш прийнятним методом гасіння. Для підвищення ефективності даного процесу потрібно проведення додаткових досліджень. Актуальним питанням є можливість і режими хімічної та теплової нейтралізації теплового розгону пошкодженого акумулятора надлишком води.

Формулювання цілей дослідження. Метою роботи є проаналізувати та дослідити процеси, що відбуваються під час теплового розгону в літій-іонних акумуляторах за умов зовнішнього механічного пошкодження та під час охолодження такого акумулятора водою.

Для досягнення поставленої мети було зазначено ряд задач:

- провести моделювання та дослідити процес теплового розгону літій-іонного акумулятора за зовнішнього механічного пошкодження;
- провести охолодження літій-іонного акумулятора за умов його теплового розгону та дослідити процес пожежогасіння за умови забезпечення наявності води у надлишку.

Методи дослідження. Об'єктом дослідження є теплові процеси в літій-іонному акумуляторі під час теплового розгону та занурення у воду. Дослідження теплового розгону після зовнішнього механічного пошкодження і охолодження водою передбачало 3 етапи: 1) добір типу літій-іонного акумулятора і підготовка механічного пошкодження; 2) вимірювання температурного режиму самонагрівання та теплового розгону в часі до займання; 3) охолодження та видалення активного металевого Li шляхом занурення акумулятора у ємність з водою у надлишку відносно маси Li для проведення реакції з врахуванням необхідності достатнього тепловідводу від осередку реакції. Достатність тепловідводу визначена розрахунками за тепловиділенням реакції літію з водою, енергією батареї та теплопоглинанням, яке забезпечує вода у рідкому стані.

Для дослідження використано літій-іонну батарею ємністю 2000 мА·год з напругою 3,7 В. Механічне пошкодження створено проколом корпусу свердлом Ø 1 мм на глибину 1,5 мм. Отвір використано для вимірювали температури внутрішніх шарів акумулятора. Контроль температури проводили термопарою, яку було введено у внутрішні шари батареї. Через отвір термопара контактувала з активними елементами акумулятора, що дозволяло реєструвати зміну температури під час самонагрівання та термічного розгону. Такий підхід також забезпечував проникнення кисню повітря та води всередину акумулятора, а також відведення газів, які утворювалися в процесі реакцій. Для контролю температури поверхні

аккумулятора застосовували безконтактний інфрачервоний термометр (радіаційний пірометр). Це забезпечило швидке виявлення критичного стану батареї – термічного розгону, який може призвести до займання або вибуху.

У ході дослідів реєстрували: час самонагрівання та горіння, характеристики полум'я, інтенсивність виділення газів, стан аккумулятора після реакції, зміни кислотності води.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для дослідження теплового розгону літій-іонного аккумулятора підготовлено установку, принципову схему якої наведено на рис. 1.

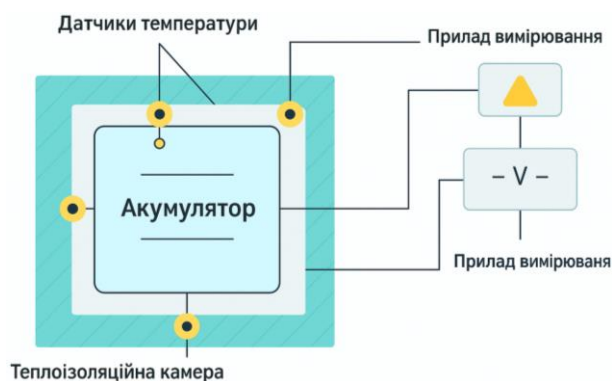


Рисунок 1 – Принципова схема експериментальної установки для дослідження зміни температур всередині механічно пошкодженого літій-іонного аккумулятора

Під час дослідження самонагрівання аккумулятора ідентифіковано стадії теплового розгону і встановлено їх тривалість за умов експерименту, рис. 2: I – первинне самонагрівання до 80 °С протягом 4 с; II – деформації після нагрівання до 110 °С за наступні 1,5 с; III – початок та інтенсифікація виходу газів з місця пошкодження за наступні 11 с та температур до 150 °С; IV – починаючи зі 160 °С коротке замикання між електродами з прискореним зростанням температури без полум'яного горіння протягом 3 с; V – інтенсифікація виходу газів та їх займання за температури 310 °С через 10 с досліду у вигляді яскравого полум'я з незначною інтенсивністю димоутворення від отвору пошкодження та з шипінням.

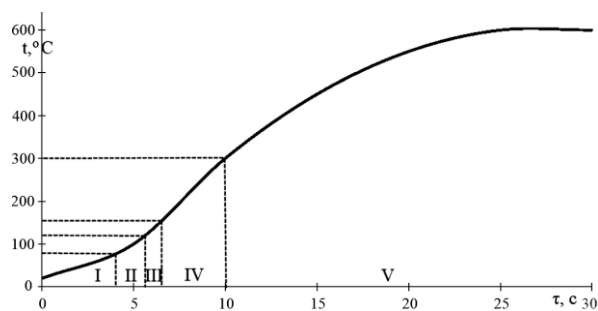


Рисунок 2 – Зміна температури механічно пошкодженого літій-іонного аккумулятора за стадіями розвитку теплового розгону

Горючі гази, що виходили з отвору пошкодження, зайнялись шляхом самоспалахування від температури перегрітого осередка реакцій. Для H_2 $t_{cc} = 510$ °С, розчинник може містити естери вугільної кислоти, наприклад, диметилкарбонат, який має $t_{cc} = 440$ °С. Тобто гази з отвору пошкодження виходили у повітря з температурою ≈ 500 °С. Сповільнення підйому температури на V стадії самонагрівання пов'язано зі зростанням інтенсивності тепловтрат, витрачанням реагентів у місці реакції, дифузійними ускладненнями під час горіння.

Отримані результати підтвердили, що зовнішнє механічне пошкодження літій-іонного аккумулятора може спричинити тепловий розгін, який завершується інтенсивним горінням і виділенням горючих газів. Тепловий, електричний або механічний вплив пошкоджує елементи конструкції, викликаючи зростання температури й тиску всередині комірок, що супроводжується екзотермічними реакціями, наприклад: $4Li + O_2 \rightarrow 2Li_2O$.

За перегріву відбувається випаровування або розкладання компонентів аккумулятора, починають виділятися горючі гази. Електроліт розкладається за реакцією: $LiPF_6 \rightarrow LiF + PF_5$, а пентафторид фосфору надалі гідролізується: $PF_5 + H_2O \rightarrow POF_3 + 2HF$. Початок теплового розгону є межею між можливістю запобігання пожежі та необхідністю здійснення її гасіння. Екзотермічні реакції (окиснення Li, розкладання електроліту) підвищують температуру до 400–600 °С. Катодні матеріали розкладаються з виділенням O_2 :

$2\text{LiCoO}_2 \rightarrow \text{Li}_2\text{O} + 2\text{CoO} + \text{O}_2$, що підтримує горіння карбонових та карбонвмісних компонентів будови акумулятора (сепаратора, електродів) з утворенням CO_2 та H_2O . Жовтогаряче полум'я зумовлене згорянням літію, натрію (домішок) та карбонвмісних сполук зі складу розчинника.

Оскільки на стадії досліду 1 було досягнуто стан теплового розгону акумулятора виникла можливість для реалізації стадії 2 досліду – гасіння водою. Теоретична кількість води для припинення горіння була розрахована на основі технічних характеристик акумулятора. Накопичена електрична енергія визначається ємністю 2,0 А·год для обраного акумулятора та робочою напругою – 3,7 В; тобто – 7,4 Вт·год. Водночас відомо, що за умови повного згоряння літій-іонного акумулятора виділяється близько 500 кДж теплоти на 1 Вт·год накопиченої енергії. Тоді за рівня цієї енергії 7,4 Вт·год під час пожежі виділиться 3700 кДж теплоти.

Охолоджуюча здатність води визначається теплоємністю рідкого та парового станів та її теплотою випаровування [21]. Але, оскільки для компенсації тепловиділення воду взято у значному надлишку, пароутворенням і подальшим нагріванням пари можна нехтувати. Тоді за умови нагріву води за контакту з перегрітою батареєю на 70 °C питоме поглинання теплоти складе 292,6 кДж/кг, а для поглинання повної теплоти потрібно: $3700/292,6 = 12,65$ кг (л) води. Така кількість води забезпечує ефективне охолодження акумулятора з її нагрівом до 90–95 °C у разі достатнього теплообміну, що у досліді здійснено зануренням акумулятора в означений об'єм води. Але нагрів води відбувся до менших температур внаслідок сповільнених реакцій та не завершеного згоряння акумулятора. Водночас слід враховувати, що взаємодія Li з водою супроводжується виділенням водню: $2\text{Li} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{LiOH} + \text{H}_2$, що вимагає додаткових заходів безпеки для запобігання повторному займанню. Візуально виділення H_2 фіксували у вигляді бульбашок, що підіймаються крізь шар

води від отвору пошкодження. У результаті реакції формується гідроксид літію, який створює лужне середовище.

Таким чином, після досягнення критичної температури із займанням акумулятора його гасили повним зануренням у воду; застосовано водопровідну воду, що відповідає реальним умовам гасіння. Завершення реакцій тривало 2 доби через поступове проникнення води до внутрішніх шарів батареї та повільне розчинення сполук літію й кобальту. Протягом 1-ї доби рН зріс до 12, а протягом 2-ї – до 14, тобто з часом реакція гальмувалася внаслідок вичерпання літію та погіршення умов дифузії до віддалених частин акумулятора.

Після термічного розгону загоранню піддаються як окремі модулі, так і вся система накопичення енергії. Конструкція блоків батареї максимізує щільність зберігання енергії, що водночас сприяє швидкому поширенню пожежі. Після займання вогонь легко поширюється на сусідні елементи й конструкційні матеріали, що може зробити його неконтрольованим.

На перших 2-х стадіях термічного розгону є можливість припинення самонагрівання акумулятора, наступні 2-і – вимагають застосування активних заходів пожежогасіння. Для 2-ї стадії доцільно проводити ранній моніторинг виділення горючих газів у повітря з одночасним відключенням акумулятора від джерела живлення та флегматизацією середовища негорючим газом для запобігання вибуху. На 3-й і 4-й стадіях необхідний пізній моніторинг продуктів горіння у повітрі для своєчасного залучення професійних пожежних підрозділів та засобів.

Таким чином, розвиток самонагрівання батареї може призвести як до її спонтанного займання, так і до ініціювання горіння речовин, що перебувають у контакті з нею. Для гасіння важливо розрізняти складові цього процесу: відносно легко ліквідувати полум'я горючих газів об'ємними вогнегасними засобами протягом кількох секунд, однак це не зупиняє внутрішніх

реакцій. З урахуванням цього стандартні водяні вогнегасні склади не є повністю придатними для зупинення горіння акумуляторів: водяні струмені [29, 30], піни [31, 32], водяні гелі [18, 33]. У відкритих умовах для гасіння металів застосовуються спеціальні порошкові засоби, які при плавленні утворюють ізолюючу плівку [34]. Проте для складної конструкції батареї цей підхід, як й інші, є малоефективним через обмежений доступ вогнегасних речовин у внутрішні шари. Крім того, Li може горіти навіть у середовищі негорючих газів, таких як CO₂.

Отже, водяне охолодження залишається більш ефективним шляхом гасіння літій-іонних акумуляторів за умови швидкого забезпечення значного надлишку води або її тривалого подавання для компенсації тепловиділення. На ранніх стадіях термічного розгону вода може застосовуватися для охолодження стінок акумуляторів. Теоретично можливе продування акумулятора інертними газами, зокрема аргон (інертний газ з великою теплоємністю) або перфторвуглеводнями, однак останні є потужними парниковими газами тривалої дії.

Висновки та напрями пошуків досліджень. 1. У досліді з моделюванням механічного пошкодження літій-іонного акумулятора отримано неконтрольований термічний розгін з виділенням горючих газів та їх самоспалахуванням. Температура отвору пошкодження в момент займання становила близько 300 °C, що відповідає стадії розвитку теплового розгону «розгерметизація корпусу та утворення горючих газів». Водночас температура самоспалахування газів, що виділяються становить 440–510 °C, що передбачає наявність такої температури всередині

акумулятору біля отвору. Самонагрівання спричиняє виділення накопиченої енергії окиснення літію, розкладання електроліту і катодного матеріалу з виділенням кисню і подальшими реакціями.

2. Досліджено взаємодію батареї з водою після її займання. Експеримент показав, що реакція літію з водою йде з виділенням водню і формуванням лужного розчину, що потенційно ускладнює гасіння; цей процес тривав 2 доби. За енергетичними показниками зарядженого акумулятора та охолоджуючої здатності води у рідкому стані оцінено її теоретичну витрату для відводу тепла від акумулятора з рівнем накопиченої енергії 7,4 Вт·год – як 12,6 л; даного обсягу виявилось достатньо для поглинання тепловиділення.

Результати дослідження можуть бути використані для розробки більш ефективних заходів пожежного захисту літій-іонних акумуляторів. Рекомендовано проводити ранній моніторинг виділення газів, що дозволить своєчасно реагувати на самонагрівання та ймовірне займання, а також пізній моніторинг газів на наступних стадіях – для оперативного реагування на пожежу. Полум'яне горіння можна локалізувати розпиленою водою, хмарою інгібітора або негорючого газу, одночасно з подачею надлишкової кількості води на сам акумулятор. Пропонується розробити систему продування батареї інертним газом (Ar), що може підвищити ефективність гасіння та безпеку експлуатації.

Під час подальших досліджень передбачено повторити схему поточного дослідження теплового розгону літій-іонного акумулятора, але не внаслідок механічного пошкодження, а за умов підвищеної температури середовища та поганих умов теплообміну із зовнішнім простором.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Alerte levée à Drogenbos: incendie maîtrisé, plus de risque pour la santé. *RTBF Actus*. URL: <https://www.rtbf.be/article/alerte-leeve-a-drogenbos-incendie-maitrise-plus-de-risque-pour-la-sante-9760282> (дата звернення: 12.02.2026).
2. Report: APS Declares Thermal Runaway Event Caused 2019 Battery Explosion. *Japan electric power information center – USA*. URL: <https://www.jepic-usa.org/digests/2020/7/31/usa-report-aps-declares-thermal-runaway-event-caused-2019-battery-explosion> (дата звернення: 12.02.2026).

3. Blaze at South Korea lithium battery plant kills 22 workers. *Reuters*. URL: <https://www.reuters.com/world/asia-pacific/about-20-bodies-found-after-fire-south-korea-battery-plant-yonhap-reports-2024-06-24/> (дата звернення: 12.02.2026).
4. Significant industrial site fires strike in India and France. *Reuters*. URL: <https://www.thefpa.co.uk/news/significant-industrial-site-fires-strike-in-india-and-france> (дата звернення: 12.02.2026).
5. Підвищення пожежної безпеки гальванічного виробництва / Ю. К. Гапон та ін. *Проблеми пожежної безпеки*. 2020. № 47. С. 23–28. URL: <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/10919>.
6. Technology of Safe Galvanochemical Process of Strong Platings Forming Using Ternary Alloy / Y. Hapon et al. *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 1006. P. 233–238. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1006.233>.
7. Design of the modified oxide-nickel electrode with improved electrical characteristics / A. Sincheskul et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. № 5/6 (89). P. 23–28. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.112264>.
8. Lisitsyna L., Tupitsyna I., Trefilova L. Spectral and kinetic characteristics of the luminescence center in LiF-WO₃ and ZnWO₄ crystals. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2015. № 81/1. P. 012024. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/81/1/012024>.
9. Lithium: A review of applications, occurrence, exploration, extraction, recycling, analysis, and environmental impact / V. Balaram et al. *Geoscience Frontiers*. 2024. № 15. P. 101868. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2024.101868>.
10. Impact assessment of battery energy storage systems towards achieving sustainable development goals / M. Hannan et al. *Journal of Energy Storage*. 2021. № 42. P. 103040. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103040>.
11. Nitta N., Wu F., Lee J. T., Yushin G. Li-ion battery materials: present and future. *Materials Today*. 2015. № 18/5. P. 252–264. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.10.040>.
12. Lithium and lithium ion batteries for applications in microelectronic devices / Yu. Wang et al. *Journal of Power Sources*. 2015. № 286. P. 330–345. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.03.164>.
13. Henriksen Ch., Mathiesen J. K., Ravnsb D. B. Improving capacity and rate capability of Li-ion cathode materials through ball milling and carbon coating - Best practice for research purposes. *Solid State Ionics*. 2020. № 344. P. 115152. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2019.115152>.
14. Guided Lithium Metal Deposition and Improved Lithium Coulombic Efficiency through Synergistic Effects of LiAsF and Cyclic Carbonate Additives / X. Ren et al. *ACS Energy Letters*. 2017. № 3/1. P. 14–19. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.7b00982>.
15. Ідентифікація кластерної будови вуглеводнів за температурами плавлення / Д. Г. Трегубов та ін. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2021. № 2 (34). С. 94–109. DOI: <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2021-34-7>.
16. Glassman I. Combustion. London : Elsevier, 2014. 757 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2011-0-05402-9>.
17. Relationship Between Properties of Floating Systems and Flammable Liquids in the Stopping Their Burning Technology / D. Tregubov et al. *Key Engineering Materials*. 2023. № 954. P. 145–155. DOI: <https://doi.org/10.4028/p-KrZRd9>.
18. Molecular design for electrolyte solvents enabling energy-dense and long-cycling lithium metal batteries / Zh. Yu et al. *Nature Energy*. 2020. № 5. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0634-5>.
19. Universal chemomechanical design rules for solid-ion conductors to prevent dendrite formation in lithium metal batteries / Ch. Fu et al. *Nature Materials*. 2020. № 19 (7). P. 758–766. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41563-020-0655-2>.
20. Willstrand O., Pushp M., Ingason H., Brandell D. Uncertainties in the use of oxygen consumption calorimetry for heat release measurements in lithium-ion battery fires. *Fire Safety Journal*. 2024. № 143. P. 104078. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.104078>.
21. Теорія процесів горіння, вибуху та пожежогасіння / Д. Г. Трегубов та ін. Харків : НУЦЗ України, 2024. 422 с. URL: <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/20224>.
22. Barowy A. The Science of Fire and Explosion Hazards from Lithium-Ion Batteries. Evanston, USA : Fire Safety Research Institute, 2023. 11 p. URL: <https://d1gi3fvl0xj2a.cloudfront.net/2023-01/The%20Science%20of%20Lithium-Ion%20Batteries%20Guide%20by%20FSRI%201.pdf>.
23. Tregubov D., Miroshnichenko D., Ulanovskij M. Thermomechanochemical evaluation of quality of coke. *Koks i Khimiya*. 2004. № 11. P. 14–19.
24. IEC 62133-2:2017+A1:2021. Specifies requirements and tests for the safe operation of portable sealed secondary lithium cells and batteries containing non-acid electrolyte, under intended use and reasonably. Int. standard. 2021. 50 p. URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/32662>.
25. Гаврилюк А. Ф., Ковалишин В. В., Яковчук Р. С. Ефективність використання переносних вогнегасників при гасінні літій-іонних акумуляторів. *Комунальне господарство міст*. 2024. № 4 (185). С. 166–171. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-4-185-166-171>.
26. Білоус В. Ю. Наукові основи аргонодугового та електронно-променевого зварювання перспективних високоміцних титанових сплавів : дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.06 / Київ, Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України. Київ, 2023. 453 с. URL: <https://uacademic.info/ua/document/0523U100195>.
27. Integrated fire protection solutions for Lithium-Ion batteries. Zug : Euralarm, 2022. 37 p. URL: <https://apsei.org.pt/wp-content/uploads/2023/09/Guidance-on-Li-Ion-Battery-Protection.pdf>.
28. Liu T., Tao C., Wang X. Cooling control effect of water mist on thermal runaway propagation in lithium ion battery modules. *Applied Energy*. 2020. № 267. P. 115087. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115087>.
29. Parkhomenko V.-P., Mykhalichko B., Parkhomenko R. Current state of use in fire firefighting and ways to increase the efficiency of aqueous fire extinguishing solutions using wetting agents. *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*. 2025. № 1 (19). С. 79–88. DOI: [https://doi.org/10.52363/nvz.2025.1\(19\).79-88](https://doi.org/10.52363/nvz.2025.1(19).79-88).
30. Improving the installation for fire extinguishing with finely dispersed water / D. Dubinin et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 2/10 (92). P. 38–43. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.127865>.
31. Fire extinguishing development directions for liquids based on the foam glass primary layer / D. Tregubov et al. *Problems of Emergency Situations*. 2024. № 2/40. P. 165–184. DOI: <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2024-40-13>.
32. Experimental Study of the Insulating Properties of a Lightweight Material Based on Fast-Hardening Highly Resistant Foams in Relation to Vapors of Toxic Organic Fluids / R. Pietukhov et al. *Materials Science Forum*. 2021. № 1038. P. 374–382. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.374>.

33. Mathematical modeling of fire-proof efficiency of coatings based on silicate composition / A. Chernukha et al. *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 1006. P. 70–75. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1006.70>.
34. Comparative analysis of the influence of various dry powder fire extinguishing compositions on the aquatic environment / V. Loboichenko et al. *Water and Energy International*. 2019. Vol. 62/7. P. 63–68. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/10154?locale=en>.

REFERENCES

1. Alerte levée à Drogenbos: incendie maîtrisé, plus de risque pour la santé. (2017). *RTBF Actus*. <https://www.rtb.be/article/alerte-levee-a-drogenbos-incendie-maitrise-plus-de-risque-pour-la-sante-9760282>.
2. Japan Electric Power Information Center – USA. (2020, July 31). *Report: APS Declares Thermal Runaway Event Caused 2019 Battery Explosion*. <https://www.jepic-usa.org/digests/2020/7/31/usa-report-aps-declares-thermal-runaway-event-caused-2019-battery-explosion>.
3. Reuters. (2024, June 24). *Blaze at South Korea lithium battery plant kills 22 workers*. <https://www.reuters.com/world/asia-pacific/about-20-bodies-found-after-fire-south-korea-battery-plant-yonhap-reports-2024-06-24/>.
4. The Fire Protection Association. (2024). *Significant industrial site fires strike in India and France*. <https://www.thefpa.co.uk/news/significant-industrial-site-fires-strike-in-india-and-france>.
5. Hapon, Yu. K., Tregubov, D. H., Tarakhno, O. V., & Filichenko, A. S. (2020). Pidvyshchennia pozhezhnoi bezpeky halvanichnoho vyrobnytstva [Improving the fire safety of galvanic production]. *Problemy pozhezhnoi bezpeky*, (47), 23–28. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/10919>.
6. Hapon, Y., Tregubov, D., Tarakhno, O., & Deineka, V. (2020). Technology of safe galvanic process of strong platings forming using ternary alloy. *Materials Science Forum*, 1006, 233–238. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1006.233>.
7. Sincheskul, A., et al. (2017). Design of the modified oxide-nickel electrode with improved electrical characteristics. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/6(89), 23–28. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.112264>.
8. Lisitsyna, L., Tupitsyna, I., & Trefilova, L. (2015). Spectral and kinetic characteristics of the luminescence center in LiF-WO₃ and ZnWO₄ crystals. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 81(1), Article 012024. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/81/1/012024>.
9. Balaram, V., et al. (2024). Lithium: A review of applications, occurrence, exploration, extraction, recycling, analysis, and environmental impact. *Geoscience Frontiers*, 15, Article 101868. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2024.101868>.
10. Hannan, M., et al. (2021). Impact assessment of battery energy storage systems towards achieving sustainable development goals. *Journal of Energy Storage*, 42, Article 103040. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103040>.
11. Nitta, N., Wu, F., Lee, J. T., & Yushin, G. (2015). Li-ion battery materials: present and future. *Materials Today*, 18(5), 252–264. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.10.040>.
12. Wang, Yu., et al. (2015). Lithium and lithium ion batteries for applications in microelectronic devices. *Journal of Power Sources*, 286, 330–345. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.03.164>.
13. Henriksen, Ch., Mathiesen, J. K., & Ravnsb, D. B. (2020). Improving capacity and rate capability of Li-ion cathode materials through ball milling and carbon coating - Best practice for research purposes. *Solid State Ionics*, 344, Article 115152. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2019.115152>.
14. Ren, X., et al. (2017). Guided Lithium Metal Deposition and Improved Lithium Coulombic Efficiency through Synergistic Effects of LiAsF and Cyclic Carbonate Additives. *ACS Energy Letters*, 3(1), 14–19. <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.7b00982>.
15. Tregubov, D. H., Tarakhno, O. V., Sokolov, D. L., & Tregubova, F. D. (2021). Identyfikatsiia klasternoi budovy vuhlevodniv za temperaturamy plavlennia [Identification of the cluster structure of hydrocarbons by melting points]. *Problemy nadzvychainykh sytuatsii*, 2(34), 94–109. <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2021-34-7>.
16. Glassman, I. (2014). *Combustion*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-05402-9>.
17. Tregubov, D., et al. (2023). Relationship between properties of floating systems and flammable liquids in the stopping their burning technology. *Key Engineering Materials*, 954, 145–155. <https://doi.org/10.4028/p-KrZRD9>.
18. Yu, Zh., et al. (2020). Molecular design for electrolyte solvents enabling energy-dense and long-cycling lithium metal batteries. *Nature Energy*, 5, 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0634-5>.
19. Fu, Ch., et al. (2020). Universal chemomechanical design rules for solid-ion conductors to prevent dendrite formation in lithium metal batteries. *Nature Materials*, 19(7), 758–766. <https://doi.org/10.1038/s41563-020-0655-2>.
20. Willstrand, O., Pushp, M., Ingason, H., & Brandell, D. (2024). Uncertainties in the use of oxygen consumption calorimetry for heat release measurements in lithium-ion battery fires. *Fire Safety Journal*, 143, Article 104078. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.104078>.
21. Tregubov, D. H., Tarakhno, O. V., Minska, N. V., & Hapon, Yu. K. (2024). *Teoriia protsesiv horinnia, vybukhu ta pozhezhohasinnia* [Theory of combustion, explosion and fire extinguishing processes]. NUCZU. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/20224>.
22. Barowy, A. (2023). *The science of fire and explosion hazards from lithium-ion batteries*. Fire Safety Research Institute. <https://dlgi3fvl0xj2a.cloudfront.net/2023-01/The%20Science%20of%20Lithium-Ion%20Batteries%20Guide%20by%20FSRI%201.pdf>.
23. Tregubov, D., Miroshnichenko, D., & Ulanovskij, M. (2004). Thermomechanicochemical evaluation of quality of coke. *Koks i Khimiya*, (11), 14–19.
24. International Electrotechnical Commission. (2021). *IEC 62133-2:2017+A1:2021. Specifies requirements and tests for the safe operation of portable sealed secondary lithium cells and batteries*. <https://webstore.iec.ch/en/publication/32662>.
25. Havryliuk, A. F., Kovalyshyn, V. V., & Yakovchuk, R. S. (2024). Efektyvnist vykorystannia perenosnykh vohnehasnykiv pry hasinni lityi-ionnykh akkumuliatoriv [Efficiency of using portable fire extinguishers when extinguishing lithium-ion batteries]. *Komunalne hospodarstvo mist*, 4(185), 166–171. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-4-185-166-171>.
26. Bilous, V. Yu. (2023). *Naukovi osnovy arhonoduhovoho ta elektronno-promenevoho zvariuvannia perspektyvnykh vysokomitsnykh tytanovykh splaviv* [Scientific basis of argon-arc and electron-beam welding of promising high-strength titanium alloys] (Doctoral dissertation). Paton Electric Welding Institute. <https://uacademic.info/ua/document/0523U100195>.

27. Euralarm. (2022). *Integrated fire protection solutions for Lithium-Ion batteries*. <https://apsei.org.pt/wp-content/uploads/2023/09/Guidance-on-Li-Ion-Battery-Protection.pdf>.
28. Liu, T., Tao, C., & Wang, X. (2020). Cooling control effect of water mist on thermal runaway propagation in lithium ion battery modules. *Applied Energy*, 267, Article 115087. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115087>.
29. Parkhomenko, V.-P., Mykhalichko, B., & Parkhomenko, R. (2025). Current state of use in fire firefighting and ways to increase the efficiency of aqueous fire extinguishing solutions using wetting agents. *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*, 1(19), 79–88. [https://doi.org/10.52363/nvcz.2025.1\(19\).79-88](https://doi.org/10.52363/nvcz.2025.1(19).79-88).
30. Dubinin, D., et al. (2018). Improving the installation for fire extinguishing with finely dispersed water. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2/10(92), 38–43. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.127865>.
31. Tregubov, D., et al. (2024). Fire extinguishing development directions for liquids based on the foam glass primary layer. *Problems of Emergency Situations*, 2(40), 165–184. <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2024-40-13>.
32. Pietukhov, R., Kireev, A., Tregubov, D., & Hovalenkov, S. (2021). Experimental study of the insulating properties of a lightweight material based on fast-hardening highly resistant foams in relation to vapors of toxic organic fluids. *Materials Science Forum*, 1038, 374–382. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.374>.
33. Chernukha, A., Teslenko, A., Kovaliov, P., & Bezuglov, O. (2020). Mathematical modeling of fire-proof efficiency of coatings based on silicate composition. *Materials Science Forum*, 1006, 70–75. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1006.70>.
34. Loboichenko, V., et al. (2019). Comparative analysis of the influence of various dry powder fire extinguishing compositions on the aquatic environment. *Water and Energy International*, 62(7), 63–68. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/10154?locale=en>.

STOPPING SELF-HEATING PROCESSES OF DAMAGED LITHIUM-ION BATTERIES BY SUPPLYING WATER

D. Tregubov, A. Maiboroda, Ye. Turbin, V. Nuianzin, D. Zhurbynskyi

National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine

KEYWORDS:

lithium-ion battery,
mechanical
damage, self-
heating, thermal
runaway, fire
extinguishing,
water, cooling,
consumption,
acidity.

ABSTRACT

This study object is the structure, operating principles and thermal runaway mechanisms of lithium-ion batteries are analyzed; attention is focused on their advantages and disadvantages, materials of solvents and electrodes used, the gas phase composition of electrode reactions, and fire hazard features. The processes course observed during the main stages of the batteries thermal runaway is summarized. A methodology is developed and a setup is assembled to investigate the damaged battery thermal runaway processes and for its extinguishing. Typical external mechanical damage to the battery that leads to uncontrolled thermal runaway is identified. The correspondence of the battery self-heating process temperature regime to thermal runaway stages determined based on temperature measurement data and visual observations. The possible chemical reactions set that cause intense self-heating, materials further decomposition, and battery deformation are considered. The self-heating cessation was investigated by immersing the battery in a container with an excess of water relative to the stoichiometric amount for the metallic lithium maximum mass that can accumulate during the battery operation. The gases release was visually recorded, and hydrogen was identified in the composition. The change in the resulting aqueous solution acidity during extinguishing by cooling with water in the excess measured. Dependencies for the reaction completion time for a investigated mechanical damage was established. The water amount required to absorb the heat that may be released during reactions was calculated; the resulting value correlates with the experimental data. Possible measures to prevent and stop burning of lithium-ion batteries are considered. It is planned to repeat the current research scheme of the lithium-ion battery thermal runaway, but not due to the mechanical damage, but under conditions of increased ambient temperature and poor heat exchange with the external space.

УДК 614.841

ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИПРОБУВАННЯ АЕРОЗОЛІВ НА ЗАЙМИСТІСТЬ У ЗАМКНУТОМУ ПРОСТОРІ ТА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

DOI: 10.52363/2518-1777-2026-21-9

Фещук Ю. Л., ORCID iD 0000-0003-4328-8473
Кравченко Р. І., ORCID iD 0000-0003-1410-4567
Хроменков Д. Г., ORCID iD 0000-0003-2662-6338
Белікова К. Г., ORCID iD 0000-0001-7475-2115
*E-mail: khromenkov_dmytro@nuczu.edu.ua

Інститут наукових досліджень з цивільного захисту НУЦЗ України, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції:
21.02.2026

Прийнято: 21.04.2026

Опубліковано:
30.05.2026

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

аерозольний розпилювач,
обладнання, випробування,
аерозоль, замкнутий простір,
займистість, джерело
займання, вогнева камера.

АНОТАЦІЯ

На основі проведених аналітичних досліджень встановлено відсутність в нашій державі обладнання для перевірки аерозольних розпилювачів на займистість в замкнутому просторі, що необхідно для проведення ринкового нагляду. Така процедура необхідна для виявлення неякісної продукції вже після потрапляння на ринок в рамках здійснення ринкового нагляду спеціально уповноваженим на те органом. До того ж проведений аналіз літературних джерел показав, що з наукової точки зору особливостям створення обладнання для проведення випробувань аерозолів в замкнутому просторі в науковій спільноті приділено недостатньо уваги. Мета досліджень – створення обладнання для випробування аерозолів на займистість в замкнутому просторі з подальшим відпрацюванням методології випробувань аерозолів за методами передбаченими в Технічному регламенті аерозольних розпилювачів. За результатами проведеної роботи обґрунтовано технічні характеристики обладнання, необхідного для визначення займистості аерозолів у замкнутому просторі та встановлено, що саме необхідно для проведення випробувань аерозолів. Створено та проведено верифікацію обладнання для випробування аерозолів на займистість в замкнутому просторі (ОВАЗЗП), що дозволяє реалізовувати метод випробувань передбачених Технічним регламентом аерозольних розпилювачів. ОВАЗЗП складається з випробувальної камери, в якій з однієї сторони знаходиться отвір для розпилення аерозолу, а з протилежної – дверцята для скидання надлишкового тиску дефлаграції, а також підставки. На основі запропонованої методології випробувань аерозолів на займистість у замкнутому просторі, що базується на вимогах Технічного регламенту аерозольних розпилювачів проведено відповідні випробування та підтверджено клас аерозолу «легкозаймистий», що збігся із заявленим виробником.

Постановка проблеми. Пожежна статистика свідчить, що з 2020 по 2025 роки в нашій державі виникло близько 100 пожеж внаслідок займання аерозольних розпилювачів, причому тільки за 2025 рік їх кількість зросла на третину, що вказує на зростаючу тенденцію. На це впливають різні фактори. Але як правило недотримання вимог пожежної, хімічної

безпеки під час транспортування аерозольних розпилювачів та їх зберігання є основними причинами виникнення пожеж за їх участі.

Аналіз пожеж спричинених займанням аерозольних розпилювачів показав, що в 90 % випадків причиною виникнення пожежі було невідповідність класу займистості аерозольного розпилювача, заявленого виробником,

фактичному класу. Як правило надзвичайно займистий аерозоль недобросовісні виробники класифікують як легкозаймистий, тим самим знижуються вимоги до їх зберігання та транспортування, що в свою чергу призводить до значних збитків, а іноді і людських жертв. Зазначене, створює передумови для проведення перевірки достовірності вимог, що висуваються до аерозольних розпилювачів згідно з [1]. Для цього існує державний ринковий нагляд, що закріплений за ДСНС. Разом з цим для проведення перевірки аерозольних розпилювачів на відповідність вимогам [1] необхідно спеціальне обладнання й відповідні лабораторії, цього на даний час в нашій державі у повній мірі немає. У зв'язку з цим виникла необхідність у створенні можливостей для випробування аерозолів на займистість у замкнутому просторі. Таким чином, створення відповідного випробувального обладнання, що має відповідати вимогам [1] є актуальною науковою задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженнями пожежної безпеки аерозольних розпилювачів займалося багато науковців. Так, в статті [2] здійснено детальний аналіз вимог нормативної бази стосовно забезпечення пожежної безпеки аерозольних розпилювачів, встановлено основні методи їх випробування на займистість, але недостатньо приділено уваги випробувальному обладнанню. В роботі [3] авторами проведено обґрунтування параметрів джерел запалювання аерозолі, що необхідно для створення обладнання для випробування аерозольних розпилювачів на займистість, створено передумови для подальшого проєктування та виготовлення такого обладнання, однак детальні технічні характеристики не визначені. В статтях [4, 5] вивчався механізм випробування аерозольних розпилювачів, зумовлений вибухом, особливості переходу аерозолі від дефлаграції до детонації. Разом з цим, не приділено уваги технічним характеристикам обладнання для проведення таких випробувань. Серед проаналізованих джерел інформації

особливу увагу слід звернути на статтю [6] в якій досліджувалися аерозолі в замкнутому просторі об'ємом 200 дм³, зокрема встановлено часові параметри дефлаграції, а також по суті клас займистості аерозолі. Водночас із даної статті незрозуміло умови проведення досліджень, а також особливості випробувального обладнання, чи відповідало воно вимогам технічного регламенту [1]. Аналіз методів випробування для класифікації аерозолів викладений в технічному звіті [7]. Значну наукову цінність містить робота [8], в якій за допомогою комп'ютерного моделювання здійснено прогнозування розповсюдження дефлаграції в просторі об'ємом 200 дм³ із встановлення межі найвищої температури при займанні. Водночас валідація даної комп'ютерної моделі із проведенням експериментальних досліджень не проведена.

Отже, на основі аналізу літературних джерел встановлено, що забезпечення пожежної безпеки аерозольних розпилювачів постійно перебуває на порядку денному проведення наукових досліджень. Проте не до кінця вирішено питання стосовно створення обладнання для випробування аерозольних розпилювачів у замкнутому просторі. Це вказує на необхідність проведення відповідних досліджень.

Формулювання цілей досліджень. Метою даної роботи є створення обладнання для випробування аерозолів на займистість в замкнутому просторі, відпрацювання методології випробувань аерозолів за методами передбаченими [1] та проведення визначених досліджень. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- обґрунтувати технічні характеристики устаткування, необхідного для визначення займистості аерозолів у замкнутому просторі;
- створити обладнання для випробування аерозолів на займистість в замкнутому просторі;
- провести експериментальні дослідження з випробування аерозолів на займистість в замкнутому просторі.

Методи дослідження. В статті використаний аналітичний метод досліджень для пошуку рішень із створення для випробування аерозолів на займистість в замкнутому просторі. Також застосований метод експериментальних досліджень, передбачений в [1].

Виклад основного матеріалу дослідження. Передумовою створення обладнання для випробування аерозолів на займистість в замкнутому просторі (далі – ОВАЗЗП) було якісне вивчення методів випробування аерозолів згідно з вимогами технічного регламенту [1], обґрунтування його технічних характеристик, в тому числі

визначення основних елементів з яких воно має складатися, їх параметрів.

Для проведення комплексної процедури випробування аерозолів на займистість необхідно наступне: водяна баня, термогігрометр, ваги, манометр, секундомір, ротаметр, лінійка металева. Проведений аналіз характеристик такого обладнання на ринку, дозволив вибрати найбільш оптимальне.

Враховуючи зазначене, складено зведену таблицю 1, в якій для методу випробування аерозолів на займистість у замкнутому просторі запропоновано устаткування із зазначенням технічних характеристик.

Таблиця 1 – Технічні характеристики устаткування, необхідного для визначення займистості аерозолів у замкнутому просторі

№ з/п	Умови застосування	Запропоноване устаткування	Технічні характеристики
1	Умови кондиціювання зразків: температура $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$; тривалість не менше ніж 30 хв; водяна баня, що підтримує температуру $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ з точністю $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$	Водяна баня Labexpert моделі 1016.5	Температура, що підтримується: від $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$; однорідність температури: $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$; стабільність температури: $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$
2	Температура у приміщенні $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$; термометр з точністю $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$	Термогігрометр Testo 608-H1	Діапазон вимірювання: температури від 0 до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$; відносної вологості від 10 % до 95 %. Похибка вимірювання: температури $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$; відносної вологості $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$
3	Відносна вологість у приміщенні від 30 % до 80 %; гігрометр (вологомір) з точністю $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$		
4	Лабораторні ваги, які дозволяють визначати масу з точністю до $\pm 0,1\text{ г}$	Ваги OHAUS SPX1202	Максимальна маса: 1200 г; дискретність зважування: 0,01 г
5	Внутрішній тиск в аерозольному розпилювачі від 1 бар до 15 бар; манометр з точністю $\pm 0,1\text{ бар}$	Манометр MT-2У-М	Діапазон вимірювання тиску: від 0 до 1.6 МПа (16 бар); Клас точності: 2,5
6	Тривалість горіння аерозолію – 5 с; тривалість вивільнення вмісту 1 с та 5 с; секундомір з точністю $\pm 0,2\text{ с}$	Секундомір СОС пр 26-2-010 Агат	Ціна поділки: шестидесятисекундної шкали: 0,2 с; шестидесятихвилинного лічильника: 1 хв. Допустима похибка вимірювання: за 10 хв – $\pm 0,6\text{ с}$; за 60 хв – $\pm 1,6\text{ с}$
7	Випробувальна циліндрична камера об'єм: приблизно 200 дм^3 ; діаметр: приблизно 600 мм; довжина: приблизно 720 мм; пластикова плівка завтовшки від 0,01 мм до 0,02 мм;	Випробувальна циліндрична камера	Об'єм: 200 дм^3 Діаметр: 600 мм Довжина: 720 мм

	подовження плівки під масою 0,45 кг: до 25 мм; підставка для свічки розміром 200 мм × 200 мм		
8	Свічка парафінова: мінімальна висота: 80 мм	Свічка	Діаметр: 20 мм Висота: 100 мм
9	Відстань між центром вхідного отвору в камері та випускним пристроєм аерозольного розпилювача: 35 мм і менше	Лінійка	Довжина 500 мм

Основна задача при створенні ОВАЗЗП полягала в дотриманні вимог Технічного регламенту аерозольних розпилювачів [1]. Тому що в подальшому дане обладнання має бути акредитоване і застосовуватись під час перевірки аерозольних розпилювачів в рамках здійснення ДСНС ринкового нагляду.

Таким чином, для випробувань щодо оцінки займистості аерозолі, що вивільняється з аерозольних розпилювачів, у замкнутому або обмеженому просторі згідно з вимогами [1] спроектовано та створено обладнання для випробування аерозолів на займистість в замкнутому просторі.

ОВАЗЗП відповідно до вимог [1] повинно складатися з випробувальної камери об'ємом 200 дм³, діаметром 600 мм, довжиною 720 мм з отвором діаметром 50 мм через який має відбуватися вивільнення аерозольних розпилювачів. Випробувальна камера має мати дверцята, що виконуються з прозорого акрилового скла діаметром 650 мм та товщиною 2,5 мм закріпленого на петлях у верхній її частині. В цілому випробувальна камера розміщується на підставці, що виконується з металевої профільної труби 60х60 мм, товщиною 2 мм. Схема ОВАЗЗП та його зовнішній вигляд після реалізації показано на рисунку 1.

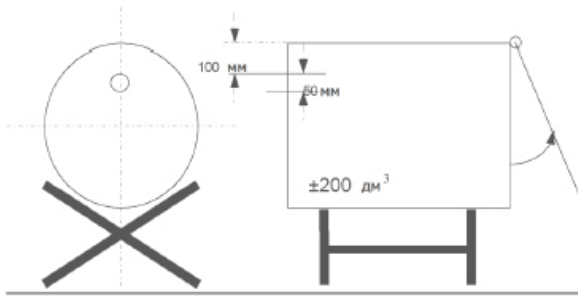


Рисунок 1 – Схематичне зображення та зовнішній вигляд ОВАЗЗП: 1 - випробувальна камера; 2 - отвір; 3 - підставка; 4 - дверцята

Відповідно до вимог [1] на металевій підставці розміром 200 х 200 мм розміщується парафінова свічка діаметром від 20 до 40 мм та заввишки 100 мм. Полум'я свічки захищається від впливу аерозолі екраном завширшки 150 мм і

заввишки 200 мм. Екран має поверхню, нахилену під кутом 45° на відстані 150 мм від його основи. Враховуючи зазначене створено підставку для свічки (рисунок 2).

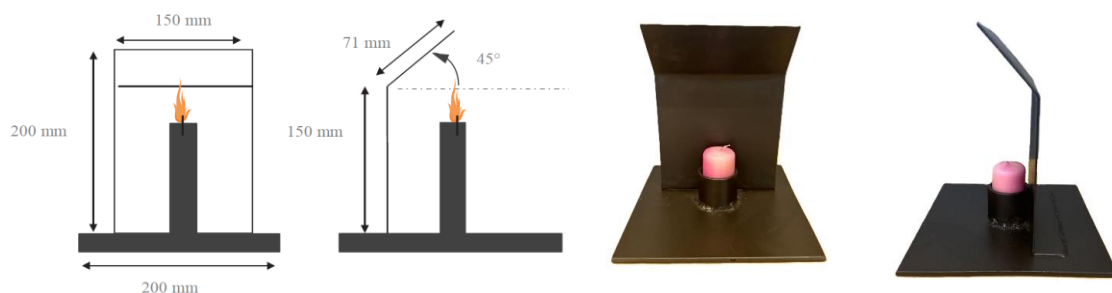


Рисунок 2 – Схематичне зображення та зовнішній вигляд металової підставки для свічки з екраном

Технічні характеристики ОВАЗЗП наведені у таблиці 2.

Таблиця 2 – Технічні характеристики ОВАЗЗП

№ п/п	Найменування показника	Одиниця вимірювання	Значення показника
1	Габаритні розміри випробувальної камери, не більше:		
	- висота	мм	800 ± 5
	- діаметр	мм	570 ± 5
2	Максимальна місткість зразка, не більше	мл	1000
3	Габаритні розміри джерела запалювання, не більше:		
	- висота	мм	100 ± 5
	- діаметр	мм	від 20 до 40

Слід зазначити, що основні деталі ОВАЗЗП виготовляються із чорного сталюого металопрокату з відповідним антикорозійним покриттям фарбою з термостійкістю до 500°C . Деталі тримачів виготовлені з полірованої неіржавіючої сталі.

Випробувальна камера виконується з суцільної металової бочки розмірами 570 мм, довжиною 815 мм та товщиною 1,5 мм.

В якості джерела вогневого впливу використовується парафінова свічка діаметром 20 мм та заввишки 100 мм, оскільки така свічка дає найбільшу висоту факелу полум'я і температуру.

Після створення відповідного обладнання його розміщено у лабораторії, проведено верифікацію, введення в експлуатацію. Зовнішній вигляд створеного ОВАЗЗП показано на рисунку 3.



Рисунок 3 – Зовнішній вигляд створеного ОВАЗЗП та його розміщення в лабораторії

Випробування аерозолів на займистість у замкнутому просторі відбувалося відповідно до процедури, що визначена в [1]. Для проведення випробувань взято устаткування відповідно до таблиці 1.

Перед випробуванням кожний аерозольний розпилювач піддавався кондиціюванню. Після чого вивільнявся його вміст приблизно упродовж 1 секунди з метою видалення неоднорідного матеріалу із зануреної трубки, приводилося в дію джерело займання аерозолію.

Випробування проводилось у добре провітреному приміщенні без протягів за температури $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ та відносної вологості 30 - 80 %.

Визначався фактичний об'єм камери за формулою:

$$V = \pi r^2 h, \quad (1)$$

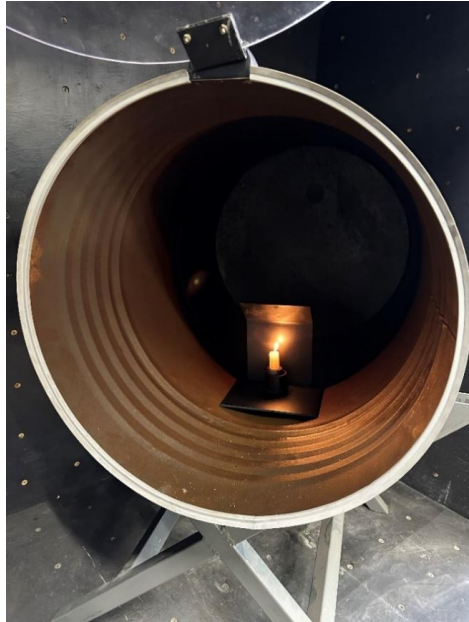
де r - радіус основи циліндра;

h - висота циліндра;

π - математична константа, приблизно рівна 3.14159.

Таким чином, за формулою 1 встановлено, що фактичний об'єм камери становить 204 дм^3 .

Наступний етап - визначення внутрішнього тиску аерозольного розпилювача, а також його маси.



Джерелом запалювання є свічка, встановлена на підставці (екрані) (рисунк 4 а).

Отвір випускного пристрою аерозольного розпилювача розміщується на відстані 35 мм від центру вхідного отвору в камеру. Запускався хронометр (секундомір), направлявся розпилений аерозоль на центр протилежного боку дверцят.

Аерозольний розпилювач випробовувався у вертикальному положенні, як вказано рекомендаціях із застосування та розпилювався до моменту займання, не менше 3 - х разів у відповідності з вимогами [1]. Займання вмісту аерозольного розпилювача показано на рисунку 4 б.



Рисунок 4 – Процедура випробування аерозольних розпилювачів: а - джерело запалювання на підставці (екрані) у випробувальній камері; б – займання вмісту аерозольного розпилювач

Часовий еквівалент (t_{eq}), за якого відбувається займання в 1 м^3 , розраховувався за формулою (2) [1]:

$$t_{eq} = \frac{100 \times \text{час вивільнення аерозолу (с)}}{\text{фактичний об'єм камери (дм}^3\text{)}} \quad (2)$$

Густину дефлаграції (D_{def}), за якої відбувається займання під час випробування, розраховувалася за формулою (3) [1]:

$$D_{def} = \frac{100 \times \text{к - сть розпиленого аерозолу (г)}}{\text{фак об'єм камери (дм}^3\text{)}} \quad (3)$$

Результати випробування аерозольних розпилювачів на займистість у замкнутому просторі згідно з п. 6.3.5 Технічного регламенту аерозольних розпилювачів подано в таблиці 3.

Таблиця 3 – Результати випробування аерозольних розпилювачів на займистість у замкнутому просторі

Назва аерозольного розпилювача	Аерозольний очисник для панелі приладів напівматовий								
	Зразок 1			Зразок 2			Зразок 3		
Вага початкова, г	295,3			350,9			360,2		
Початковий тиск в розпилювачі, МПа	0,29			0,3			0,3		
№ випробування	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Маса розпиленого аерозолі, г	8,3	7,2	6,8	7,3	7,3	8,2	8,8	8,5	7,5
Час вивільнення до моменту займання, с	7,0	5,37	5,42	5,1	5,02	5,6	6,0	6,2	6,3
Часовий еквівалент, теп, с/дм^3	34,3	26,32	26,56	25,0	24,6	27,45	29,41	30,39	30,88
Густина дефлагації, $D_{\text{def}}, \text{г/дм}^3$	40,68	35,29	33,3	35,78	35,78	40,19	43,13	41,66	36,76
Кінцевий тиск в розпилювачі, МПа	0,3			0,3			0,3		
Фактичний об'єм камери, дм^3	204								

Враховуючи те, що на основі визначеної теплоти згоряння досліджуваного аерозолі згідно з [9], встановленої відстані на якій відбувається його займання згідно з п. 6.3 додатка 1 [1], підтверджено, що займання досліджуваного аерозолі відбулося і він віднесений до легкозаймистих, то випробування досліджуваного аерозолі в замкнутому просторі проводилося виключно з наукового інтересу, а отже можна прийти до висновку щодо його класифікації.

Таким чином, на основі проведених досліджень, згідно з підпунктом в) підпункту 1 пункту 1.11.1 додатка 1 [1], аерозольний очисник для панелі приладів напівматовий, (досліджувався під час проведення випробувань) класифікується як легкозаймистий.

Висновки та напрями подальших досліджень.

1. Встановлено, що в нашій державі відсутнє обладнання для перевірки аерозольних розпилювачів на займистість в замкнутому просторі, що необхідно для проведення ринкового нагляду. До того ж проведений аналіз літературних джерел показав, що з наукової точки зору

особливостям створення обладнання для проведення випробувань аерозолі в замкнутому просторі в науковій спільноті приділено недостатньо уваги.

2. Обґрунтовано технічні характеристики устаткування, необхідного для визначення займистості аерозолі у замкнутому просторі та встановлено, що для проведення випробувань аерозолі необхідне наступне: водяна баня, термогігрометр, ваги, манометр із спеціальною насадкою, секундомір, випробувальна циліндрична камера, свічка, лінійка.

3. Створено та проведено верифікацію обладнання для випробування аерозолі на займистість в замкнутому просторі (ОВАЗЗП), що дозволяє реалізовувати метод випробувань передбачених Технічним регламентом аерозольних розпилювачів.

4. На основі запропонованої методології випробувань аерозолі на займистість у замкнутому просторі, що базується на вимогах Технічного регламенту аерозольних розпилювачів проведено відповідні випробування та підтверджено клас аерозолі «легкозаймистий», що збігся із заявленим виробником.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про затвердження Технічного регламенту аерозольних розпилювачів: Постанова Кабінету Міністрів України від 21.02.2023 № 154. *Урядовий кур'єр*. 25.02.2023. № 40.
2. Хроменков Д.Г., Гулик Ю.Б., Лыченко Н.М., Кравченко Р.І. (2019). Дослідження щодо методів оцінки пожежонебезпечних властивостей аерозольних компонентів, а саме методів визначення границь займистості газів. *Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобіля Національного університету цивільного захисту України «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*, (3), 78–86.

3. Фешчук Ю.Л., Кравченко Р.І., Хроменков Д.Г., Гулик Ю.Б. (2025) Обґрунтування параметрів джерел запалювання аерозолію при створенні обладнання для випробування аерозольних розпилювачів на займистість. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*, 2 (20), 98 – 108.
4. Shuai Yuan, Chenxi Ji, Haitian Han, Yue Sun, Chad V. Mashuga. A review of aerosol flammability and explosion related incidents, standards, studies, and risk analysis. *Process Safety and Environmental Protection*. Volume 146, February 2021, Pages 499-514. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.11.032>.
5. Xuhai Pan, Feng Xie., Long Ding, He Wang, Shucheng Guo, Zhenyu Wang. Experimental study of spray explosion characteristics and flame propagation in methanol blended water/ethanol. *Fuel*. Volume 397, 1 October 2025, 135458. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.135458>.
6. Bozena Kukfisz. (2018). Flammability parameters of sprayed and foam aerosols selected for studies. *Fire and Environmental Safety Engineering. MATEC Web Conference*, (247), 8.
7. Analysis of Aerosol Flammability Classification Method. *Technical Report. Factory Mutual Research*, 1993.
8. Henk Versteeg, Graham Hargrave, L. Harrington, I. Shrubbs. The use of computational fluid dynamics (CFD) to predict pMDI air flows and aerosol plume formation. *The AAPS Journal* (2018).
9. ДСТУ ASTM D240:2023 (ASTM D240-19, IDT) «Палива рідинні вуглеводневі. Метод визначення теплоти згоряння в калориметричній бомбі». Чинний від 2024-02-10. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2024. 75 с.

REFERENCES

1. On approval of the Technical Regulations for aerosol sprayers: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 02/21/2023 No. 154. Government Courier. 02/25/2023. No. 40.
2. Khromenkov D.G., Gulyk Yu.B., Ilchenko N.M., Kravchenko R.I. (2019). Research on methods for assessing the fire hazard properties of aerosol components, namely methods for determining the flammability limits of gases. Collection of scientific papers of the Cherkasy Institute of Fire Safety named after the Heroes of Chernobyl of the National University of Civil Defense of Ukraine "Emergency situations: prevention and liquidation", (3), 78–86.
3. Feshchuk Yu.L., Kravchenko R.I., Khromenkov D.G., Gulyk Yu.B. (2025) Justification of aerosol ignition source parameters when creating equipment for testing aerosol sprayers for flammability. *Scientific Bulletin: Civil Defense and Fire Safety*, 2 (20), 98 – 108.
4. Shuai Yuan, Chenxi Ji, Haitian Han, Yue Sun, Chad V. Mashuga. A review of aerosol flammability and explosion related incidents, standards, studies, and risk analysis. *Process Safety and Environmental Protection*. Volume 146, February 2021, Pages 499-514. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.11.032>.
5. Xuhai Pan, Feng Xie., Long Ding, He Wang, Shucheng Guo, Zhenyu Wang. Experimental study of spray explosion characteristics and flame propagation in methanol blended water/ethanol. *Fuel*. Volume 397, 1 October 2025, 135458. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.135458>.
6. Bozena Kukfisz. (2018). Flammability parameters of sprayed and foam aerosols selected for studies. *Fire and Environmental Safety Engineering. MATEC Web Conference*, (247), 8.
7. Analysis of Aerosol Flammability Classification Method. *Technical Report. Factory Mutual Research*, 1993.
8. Henk Versteeg, Graham Hargrave, L. Harrington, I. Shrubbs. The use of computational fluid dynamics (CFD) to predict pMDI air flows and aerosol plume formation. *The AAPS Journal* (2018).
9. DSTU ASTM D240:2023 (ASTM D240-19, IDT) "Liquid hydrocarbon fuels. Method for determining the heat of combustion in a calorimetric bomb. Valid from 2024-02-10. Kyiv: State Enterprise "UkrNDNC", 2024. 75 p.

SUBSTITUTION OF TECHNICAL CHARACTERISTICS OF EQUIPMENT FOR TESTING AEROSOLS FOR FLAMMABILITY IN A CLOSED SPACE AND CONDUCTING EXPERIMENTAL RESEARCH

Y. Feshchuk, R. Kravchenko, D. Khromenkov, K. Bielikova

Institute of Scientific Research on Civil Protection of the National University of Civil Protection of Ukraine

KEYWORDS: ABSTRACT

aerosol
sprayer,
equipment for
testing
aerosol
aerosols in a
confined
space,
flammability,
ignition
source, fire
chamber.

Based on the analytical studies conducted, it was established that our country lacks equipment for testing aerosol dispensers for flammability in a confined space, which is necessary for market surveillance. Such a procedure is necessary to identify low-quality products after they enter the market within the framework of market surveillance by a specially authorized body. In addition, the analysis of literary sources showed that from a scientific point of view, the features of creating equipment for testing aerosols in a confined space have not been given enough attention in the scientific community. The purpose of the research is to create equipment for testing aerosols for flammability in a confined space with further development of the methodology for testing aerosols using the methods provided for in the Technical Regulations for Aerosol Dispensers. Based on the results of the work, the technical characteristics of the equipment necessary for determining the flammability of aerosols in a confined space were substantiated and it was established what exactly is needed for testing aerosols. The equipment for testing aerosols for flammability in a confined space (OVAZZP) has been created and verified, which allows implementing the test method for aerosol sprayers provided for by the Technical Regulations. OVAZZP consists of a test chamber, in which on one side there is an opening for aerosol spraying, and on the opposite side there is a door for releasing excess deflagration pressure, as well as a stand. Based on the proposed methodology for testing aerosols for flammability in a confined space, which is based on the requirements of the Technical Regulations for aerosol sprayers, the corresponding tests were carried out and the aerosol class "highly flammable" was confirmed, which coincided with the declared manufacturer.

УДК 614.841

УДОСКОНАЛЕННЯ КЛАСИФІКАЦІЇ ГРУП МОБІЛЬНОСТІ НАСЕЛЕННЯ НА ОСНОВІ ПАРАМЕТРИЧНО-ОРІЄНТОВАНОГО ПІДХОДУ

DOI: 10.52363/2518-1777-2026-21-10

Хлевной О. В.^{1*}, ORCID iD 0000-0003-2846-3480

Жезло-Хлевна Н. В.¹, ORCID iD 0009-0005-3768-2863

Борисова А. С.², ORCID iD 0000-0002-8700-0761

*E-mail: olexandr.khlevnoy@gmail.com

¹Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна

²Інститут наукових досліджень з цивільного захисту НУЦЗ України, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції:

20.04.2026

Прийнято: 05.05.2026

Опубліковано:

30.05.2026

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

евакуація при пожежі, мобільність населення, маломобільні групи, параметрична модель, евакуаційні потоки, коефіцієнт асистованості, опори, колісні крісла, протези, моделювання евакуації.

АНОТАЦІЯ

У статті розглянуто актуальну науково-прикладну проблему вдосконалення підходів до класифікації мобільності населення. Показано, що традиційні методи, засновані на дискретному поділі людей на групи мобільності (М1-М4), не забезпечують необхідної точності в умовах сучасних евакуаційних процесів, які характеризуються високим рівнем неоднорідності та наявністю значної частки осіб із різними функціональними обмеженнями. Обґрунтовано, що існуючі підходи не враховують повною мірою вплив використання допоміжних засобів пересування, протезів нижніх кінцівок, а також сценаріїв асистованого переміщення, що особливо актуально в сучасних умовах. Запропоновано параметрично-орієнтований підхід до класифікації мобільності, який поєднує узагальнений поділ на три групи за кінематикою руху з детальним описом індивідуальних характеристик через систему кількісних коефіцієнтів. У межах підходу введено параметри, що враховують фізичну працездатність, вікові особливості, використання допоміжних засобів, протезів, поведінкові характеристики та рівень організованості евакуаційного потоку. Додатково запропоновано коефіцієнт асистованості, який дозволяє кількісно описати ефективність колективного переміщення осіб, що не здатні до самостійного руху, залежно від способу транспортування та умов середовища. Обґрунтовано, що застосування параметричного підходу дозволяє підвищити адекватність математичного моделювання евакуаційних процесів, зокрема при аналізі змішаних потоків та різних сценаріїв поведінки людей. Показано можливість інтеграції запропонованої моделі у розрахунки часу евакуації, а також у сучасні імітаційні системи, що враховують вплив щільності потоку на швидкість руху та формування заторів. Визначено перспективні напрями подальших досліджень, пов'язані з експериментальним визначенням параметрів моделі, їх валідацією та адаптацією до різних типів об'єктів і умов евакуації.

Постановка проблеми. Ефективна евакуація людей під час пожежі є ключовим елементом забезпечення пожежної безпеки будівель і споруд. У сучасних умовах зростання складності надзвичайних ситуацій особливої актуальності набуває точне врахування особливостей руху

маломобільних груп населення. Чинні нормативні документи України [1, 2] встановлюють чотири групи мобільності (М1-М4) із фіксованими відсотками у змішаному потоці та узагальненими розрахунковими швидкостями. Такий підхід, сформований ще в радянський

період, на сьогодні не відповідає реаліям воєнного часу.

Повномасштабне вторгнення російської федерації спричинило безпрецедентне збільшення кількості осіб з обмеженою мобільністю. За даними Національної служби здоров'я України та Міністерства соціальної політики, з 2022 по 2025 рік зафіксовано понад 90 тисяч ампутацій, із яких близько 60 % припадає на нижні кінцівки, а частка двосторонніх ампутацій сягає 10 % [3]. Поряд із цим внаслідок несприятливої демографічної ситуації спостерігається збільшення чисельності осіб похилого віку в загальній структурі населення, а також осіб з тимчасовими порушеннями здоров'я внаслідок бойових дій і психоемоційного стресу. У багатьох регіонах частка маломобільних груп у загальному потоці перевищує 15-25 %, що суттєво вищий за нормативні показники.

Проведений аналіз чинної класифікації груп мобільності населення М1-М4 дозволяє виявити низку суттєвих обмежень, які знижують її ефективність при використанні у розрахунках евакуації та моделюванні поведінки людських потоків у разі пожежі.

Перш за все, слід відзначити недостатній рівень деталізації класифікації. Існуючий поділ передбачає лише чотири узагальнені групи, у межах яких об'єднуються особи з різними функціональними можливостями. Такий підхід не дозволяє адекватно відобразити реальну неоднорідність населення, оскільки в межах однієї групи можуть перебувати як особи з незначним зниженням швидкості руху, так і ті, що мають суттєві обмеження мобільності. Зокрема, група М2 об'єднує осіб похилого віку, вагітних жінок, батьків з візками та осіб із тимчасовими порушеннями, біомеханічні параметри яких можуть суттєво відрізнятися.

Другим важливим недоліком є відсутність у класифікації окремих категорій населення, характерних для сучасних умов. Зокрема, не виділено осіб, які використовують протези нижніх кінцівок, хоча їх кількість суттєво зросла, а

особливості їх пересування істотно відрізняються від інших груп. Аналогічно, не враховано осіб із тимчасовими порушеннями мобільності, такими як травми або післяопераційні стани, що можуть істотно впливати на швидкість та спосіб евакуації.

Третім суттєвим обмеженням є відсутність диференціації за типом допоміжних засобів пересування. У межах наявних груп не розрізняються особи, які використовують одну опору (палицю), дві опори (милиці), ходунки або інші засоби підтримки. Також відсутній поділ колісних крісел на моторизовані та немоторизовані. Водночас відомо, що зазначені фактори мають принциповий вплив на швидкість руху, стійкість, маневреність та здатність долати перешкоди, зокрема сходові марші.

Четвертим недоліком є ігнорування вікових особливостей мобільності. Діти, особливо молодшого віку, мають специфічні характеристики поведінки та руху під час евакуації, які відрізняються як від дорослих, так і від осіб похилого віку. Однак у межах класифікації М1-М4 вони не виділені в окрему категорію, що ускладнює врахування їх впливу на формування та динаміку людських потоків.

Крім того, існуючий підхід базується на дискретному поділі населення, який не враховує безперервного характеру зміни мобільності. У реальних умовах мобільність людини може змінюватися залежно від фізичного стану, рівня втоми (особливо це стосується осіб похилого віку та осіб з протезами нижніх кінцівок), психологічних факторів та умов середовища. Жорстке віднесення до однієї з чотирьох груп не дозволяє відобразити ці зміни та призводить до спрощення моделей евакуації.

Слід також відзначити, що класифікація не враховує комбіновані порушення мобільності, коли особа одночасно має кілька обмежень (наприклад, використання протеза та допоміжних засобів пересування). Такі випадки є досить поширеними, однак не мають адекватного відображення в існуючій системі.

Зазначені недоліки наявної класифікації груп мобільності M1-M4, яка використовується у вітчизняній практиці, обмежує її застосовність у сучасних умовах та обґрунтовує необхідність розроблення удосконаленої класифікації, яка б більш повно відображала реальні характеристики населення та забезпечувала підвищення точності розрахунків евакуації.

Таким чином, актуальність проблеми зумовлена необхідністю переходу від застарілих узагальнених підходів до сучасної, динамічної та параметрично-орієнтованої системи груп мобільності, яка відповідає принципам ефективнісно-орієнтованих показників пожежної безпеки та реальним викликам воєнного часу в Україні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Проблематика класифікації груп мобільності населення в контексті забезпечення пожежної безпеки та евакуації розглядається у двох основних площинах: нормативно-регуляторній та науково-модельній.

У нормативних документах різних країн класифікація мобільності, як правило, має дискретний характер. Зокрема, у документах National Fire Protection Association (NFPA 101) та рекомендаціях International Organization for Standardization (ISO 21542) виділяються категорії осіб із обмеженою мобільністю (persons with limited mobility), що включають людей похилого віку, осіб з інвалідністю, тимчасово травмованих тощо [1], [2]. Аналогічні підходи використовуються у європейських нормах, зокрема в EN 81-70 та пов'язаних документах, де також застосовується узагальнене групування без детальної параметризації [3].

У вітчизняній нормативній базі традиційно використовується класифікація населення за групами мобільності (M1-M4), яка широко застосовується при розрахунках евакуації. Однак зазначений підхід базується на жорсткому поділі на групи з фіксованими характеристиками, що не дозволяє враховувати різноманітність індивідуальних особливостей, наприклад,

молоді особи з протезами та особи з протезами похилого віку мають кардинально різні параметри руху, але при цьому входять до групи M2, а тому наділені однаковими параметрами [4].

Наукові дослідження останніх років демонструють перехід від таких спрощених класифікацій до більш гнучких підходів. У фундаментальних роботах з динаміки евакуації підкреслюється необхідність врахування індивідуальних характеристик людини, що впливають на швидкість та спосіб руху [5]. Емпіричні дослідження показують, що швидкість евакуації суттєво залежить від віку, фізичного стану та функціональних обмежень, причому розкид значень у межах однієї групи може бути співставним із різницею між групами [6].

Окремий напрям становлять дослідження евакуації маломобільних груп населення. Зокрема, встановлено, що наявність осіб з обмеженими можливостями суттєво впливає на загальну динаміку потоку, змінюючи як швидкісні характеристики, так і просторову структуру руху [7]. При цьому традиційні класифікації не забезпечують адекватного опису таких процесів через відсутність механізмів урахування асистованого руху та використання технічних засобів.

Сучасні підходи до моделювання евакуації (зокрема, агентно-орієнтовані моделі) передбачають опис кожного індивіда через набір параметрів, що визначають його мобільність і поведінку [8]. Це фактично відповідає переходу від групових до параметричних моделей, однак у більшості випадків такі параметри не інтегровані в узагальнену класифікаційну систему.

Таким чином, аналіз нормативних та наукових джерел свідчить про доцільність переходу до параметрично-орієнтованих підходів, що обумовлює необхідність розроблення удосконаленої класифікації, яка поєднувала б узагальнення та гнучкий опис мобільності.

Методи дослідження. Дослідження базується на комплексному аналітичному підході, який поєднує систематичний

аналіз наукової літератури, нормативних документів та практичних рекомендацій у сфері евакуації населення та пожежної безпеки. Проведено критичний огляд існуючих класифікацій груп мобільності, із виділенням їхніх переваг та обмежень у контексті воєнних реалій України.

На основі цього аналізу сформовано концепцію параметрично-орієнтованої класифікації, яка враховує ключові індивідуальні та групові характеристики: біомеханічні особливості, вікові та фізіологічні фактори, типи допоміжних засобів. Окрему увагу приділено диференціації тимчасових і постійних обмежень мобільності, що дозволяє підвищити адаптивність системи класифікації до реальних умов.

Робота передбачає структурне узагальнення та формалізацію параметрів мобільності у вигляді груп та підгруп, що забезпечує основу для подальшого формалізованого опису евакуаційних процесів. Аналітичний підхід супроводжується порівнянням можливих варіантів групування, що гарантує зручність застосування запропонованої класифікації в різних типах об'єктів та сценаріях евакуації.

Формулювання цілей дослідження полягає у розробці концептуальної параметрично-орієнтованої класифікації груп мобільності населення, адаптованої до сучасних воєнних умов України, яка забезпечує врахування індивідуальних біомеханічних особливостей та демографічних характеристик, а також створює основу для підвищення точності планування евакуаційних заходів і інклюзивності будівель.

Задля досягнення мети необхідно вирішити низку завдань дослідження:

- виконати аналіз та узагальнення існуючих класифікацій груп мобільності та їхніх параметрів, з ідентифікацією обмежень для застосування у сучасних реаліях;

- розробити параметрично-орієнтовану концепцію класифікації, що

включає виділення груп та підгруп мобільності на основі біомеханічних, вікових, фізіологічних характеристик;

- сформувати науково обґрунтовані рекомендації щодо застосування оновленої класифікації у практичній діяльності з планування евакуації, зокрема для різних типів об'єктів та сценаріїв руху населення, як підґрунтя підвищення ефективності евакуаційних заходів.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Як вже було зазначено вище, основною проблемою наявного поділу на групи мобільності є їх дискретність, тобто віднесення людини до однієї з наперед визначених груп без урахування конкретних факторів, що визначають її рух. Тобто, не враховуються відмінності між особами, які використовують різну кількість опор, не виділяються особи з протезами [9, 10], а також не враховується специфіка руху осіб, що пересуваються на колісних кріслах. Водночас з точки зору евакуації визначальним є не медичний стан людини чи причина обмеження, а її функціональна здатність до переміщення в потоці, що проявляється через швидкість руху, маневреність та займаний простір.

У зв'язку з цим доцільно перейти від виключно дискретної класифікації до комбінованого підходу, який поєднує узагальнені групи з параметричним описом мобільності.

У результаті проведеного аналізу встановлено, що доцільним є розділення факторів, які визначають процес евакуації, на декілька незалежних складових, кожна з яких відображає окремий аспект формування евакуаційного потоку. Запропонований підхід базується на принципі декомпозиції, відповідно до якого мобільність людини розглядається як інтегральна характеристика, що формується під впливом механічних, фізіологічних та поведінкових чинників.

Для деталізації характеристик руху вводиться параметричний опис, у межах якого кожна особа характеризується набором коефіцієнтів, що відображають її

функціональні можливості. Структуру параметричної моделі наведено на рисунку 1.

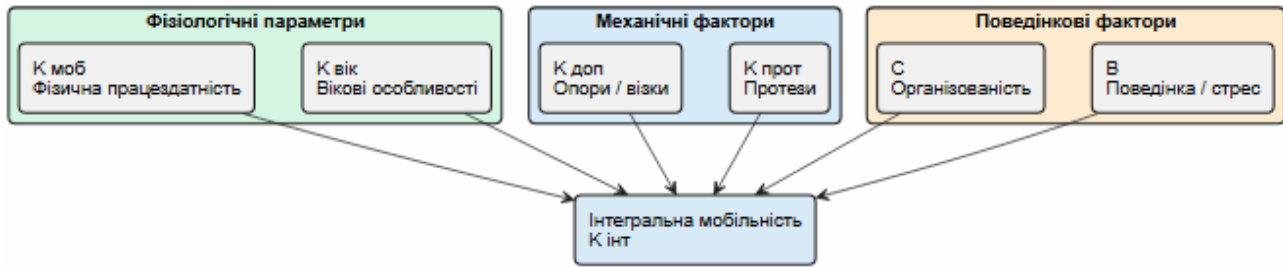


Рисунок 1 – Структура параметричної моделі мобільності учасників евакуації

Перш за все, запропонований підхід передбачає виділення трьох базових груп за кінематикою мобільності:

- КМ1 – особи, що здійснюють рух без використання допоміжних засобів;
- КМ2 – особи, що використовують технічні засоби для самостійного переміщення;
- КМ3 – особи, які не здатні до самостійного руху.

Такий поділ дозволяє формалізувати кінематичні особливості руху та їх вплив на формування евакуаційного потоку.

Кожна особа в межах груп КМ1-КМ3 додатково характеризується системою параметрів.

У запропонованій моделі **фізіологічні параметри** характеризують індивідуальні можливості людини до пересування та задаються за допомогою системи параметрів, представлених у вигляді поправочних коефіцієнтів. Кожен із таких коефіцієнтів відображає вплив окремого фактору, зокрема фізичної підготовленості чи вікових особливостей на швидкість та ефективність руху. Важливою перевагою такого підходу є можливість незалежного дослідження кожного параметра та його подальшого уточнення без необхідності перегляду всієї класифікаційної структури.

Механічні параметри відображають спосіб реалізації руху за допомогою механічних допоміжних засобів, зокрема, опор, протезів, колісних крісел тощо.

Окрім механічних та фізіологічних чинників, істотний вплив на процес евакуації мають **поведінкові параметри**, пов'язані з

рівнем організованості руху. У зв'язку з цим до моделі доцільно включити окремі коефіцієнти, які дають змогу врахувати ступінь впорядкованості евакуаційного потоку. Ці параметри відображають наявність або відсутність керування рухом людей, що суттєво впливає на ефективність евакуації, а також індивідуальні особливості поведінки. Зокрема, для об'єктів із високим рівнем організації (заклади освіти, військові об'єкти) характерні більш впорядковані потоки з меншими втратами часу, тоді як для об'єктів із вільною поведінкою людей (торговельні центри, громадські простори) притаманна підвищена хаотичність руху, що призводить до збільшення часу евакуації.

Запропонована вище концепція передбачає розділення опису евакуаційного процесу на три взаємопов'язані рівні: механічний, фізіологічний та поведінковий. Узагальнено мобільність людини може бути представлена у вигляді функції:

$$K_{\text{інт}} = K_{\text{моб}} \cdot K_{\text{вік}} \cdot K_{\text{доп}} \cdot K_{\text{прот}} \cdot K_{\text{асист}} \cdot C \cdot B \cdot M \quad (1)$$

де $K_{\text{інт}}$ – інтегральний коефіцієнт мобільності; $K_{\text{моб}}$ – коефіцієнт базової індивідуальної мобільності; $K_{\text{вік}}$ – віковий коефіцієнт; $K_{\text{доп}}$ – коефіцієнт допоміжних засобів; $K_{\text{прот}}$ – коефіцієнт впливу протезів; $K_{\text{асист}}$ – коефіцієнт асистованості; C – коефіцієнт організованості потоку; B – поведінковий коефіцієнт; M – коефіцієнт маневреності.

З метою уникнення дублювання впливу факторів у параметричній моделі мобільності доцільним є чітке розмежування змісту окремих коефіцієнтів.

Зокрема, коефіцієнт базової мобільності $K_{\text{моб}}$ слід інтерпретувати як характеристику індивідуальної фізичної працездатності людини, що визначається рівнем її функціонального стану, зокрема силою, витривалістю та координаційними здібностями. При цьому важливо, що $K_{\text{моб}}$ не враховує вплив вікових факторів, які враховуються окремо за допомогою коефіцієнта $K_{\text{вік}}$. Такий підхід дозволяє розділити вплив біологічного віку та індивідуальної фізичної підготовленості, що є принципово важливим для адекватного опису реальних умов, оскільки фізичний стан осіб однієї вікової групи може суттєво відрізнятися.

Для врахування сценаріїв евакуації, у яких особи не здійснюють самостійного руху, до параметричної моделі введено коефіцієнт асистованості $K_{\text{асист}}$. Даний параметр відображає вплив зовнішньої допомоги на процес переміщення та застосовується виключно для осіб, віднесених до групи КМЗ, тобто таких, що не здатні до самостійного пересування. На відміну від інших коефіцієнтів, що характеризують індивідуальні властивості людини, $K_{\text{асист}}$ описує ефективність колективного переміщення, яке реалізується за участю інших осіб або із застосуванням транспортних засобів. Значення коефіцієнта визначається способом транспортування та рівнем організації процесу. Зокрема, ручне перенесення (наприклад, дітей або

постраждалих) характеризується найнижчими значеннями через значні фізичні витрати та обмежену швидкість руху. Транспортування на каталках або ношах забезпечує більш стабільний рух, однак залишається обмеженим умовами середовища. Найвищі значення коефіцієнта можуть спостерігатися при переміщенні у колісних кріслах за участю асистента, особливо в умовах достатньої ширини проходів та відсутності перешкод. Разом з тим цей коефіцієнт тісно пов'язаний із параметром організованості потоку C , оскільки ефективність асистованого переміщення суттєво залежить від координації дій персоналу та загальної впорядкованості евакуаційного процесу.

Включення коефіцієнта асистованості до моделі дозволяє врахувати широкий спектр практичних сценаріїв евакуації, характерних, зокрема, для медичних закладів, закладів соціального захисту та інших об'єктів із високою часткою маломобільних осіб, що істотно підвищує адекватність моделювання та точність розрахунків часу евакуації.

Запропоноване розмежування параметрів (таблиця 1) забезпечує їх відносну незалежність та запобігає дублюванню впливів, що підвищує коректність математичної моделі та створює передумови для подальшої ідентифікації параметрів на основі експериментальних даних.

Таблиця 1 – Параметри моделі

Позначення	Назва параметра	Фізичний зміст	Діапазон значень	Орієнтовні значення	Коментар
$K_{\text{доп}}$	Коефіцієнт допоміжних засобів	Враховує вплив опор, ходунків, колісних крісел	0,4...1,0	1,0 – без засобів; ~0,8 – 1 опора; 0,5...0,7 – 2 опори/ ходунки; 0,4...0,8 – колісні крісла	Об'єднує всі типи допоміжних засобів пересування в єдиному параметрі
$K_{\text{прот}}$	Коефіцієнт впливу протезів	Враховує вплив протезів на ефективність руху	0,6...1,0	0,8...0,9 – протез гомілки; 0,6...0,8 – протез стегна 0,4...0,7 – двосторонні протези	Особливо актуальний для сучасних умов України
$K_{\text{вік}}$	Віковий коефіцієнт	Відображає вплив віку на швидкість і стабільність руху	0,6...1,0	1,0 – дорослі; 0,7...0,9 – діти; 0,6...0,8 – літні	Дозволяє врахувати присутність дітей та осіб похилого віку

Позначення	Назва параметра	Фізичний зміст	Діапазон значень	Орієнтовні значення	Коментар
$K_{асист}$	Коефіцієнт асистованості	Враховує допомогу інших учасників	0,3...1,0	~0,3...0,8 – ручне перенесення (дітей); 0,5...0,8 – транспортування на каталці; 0,7...1,0 – асистоване переміщення у колісному кріслі	Актуальний для осіб, що не можуть пересуватися самостійно
C	Коефіцієнт організованості	Характеризує ступінь впорядкованості евакуаційного потоку	0,5...1,0	1,0 – керований потік; 0,7...0,9 – частково організований; 0,5...0,7 – хаотичний	Враховує управління евакуацією, яке може бути різним в залежності від типу закладу
B	Поведінковий коефіцієнт	Відображає вплив стресу, паніки, дезорієнтації	0,6...1,0	0,9...1,0 – спокійна поведінка; 0,7...0,9 – помірний стрес; 0,6...0,8 – паніка	Залежить від сценарію та обставин пожежі
M	Маневреність	Здатність змінювати напрямок руху	0,5...1,0	1,0 – вільний рух; 0,7...0,9 – опори, протези; 0,5...0,8 – колісні крісла, каталки	Важливий для вузьких проходів

Використання інтегрального коефіцієнта мобільності дозволяє пов'язати індивідуальні характеристики людини зі швидкістю її руху:

$$v = K_{\text{інт}} \cdot v_0, \quad (2)$$

де v_0 – базова швидкість руху для повністю мобільних осіб. Такий підхід дозволяє враховувати широкий спектр станів без введення додаткових груп.

Запропонована модель має низку суттєвих переваг порівняно з традиційними

підходами (таблиця 2). По-перше, вона дозволяє врахувати реальну різноманітність станів людей без збільшення кількості груп. По-друге, забезпечується гнучкість моделі, оскільки зміна параметрів дозволяє адаптувати її до різних умов. По-третє, модель є придатною для подальшого використання у математичних та імітаційних моделях евакуації.

Таблиця 2 – Порівняльна характеристика традиційної та параметрично-орієнтованої класифікацій груп мобільності населення у задачах евакуації

Критерій	Традиційна класифікація (M1–M4)	Запропонована класифікація
Принцип побудови	Дискретний поділ на групи	Комбінований: поділ на групи із врахуванням параметрів
Опис мобільності	Узагальнений	Індивідуалізований
Охоплення маломобільних груп населення	Обмежене	Розширене (деталізовано протези, допоміжні засоби, асистування)
Поведінкові та організаційні фактори	Не враховуються	Враховуються
Гнучкість застосування	Низька	Висока
Придатність до моделювання	Обмежена	Висока

Особливо важливо, що у межах запропонованого підходу такі фактори, як використання опор, протезів або колісних крісел, не потребують введення окремих

категорій, а природним чином інтегруються в модель через параметри.

Запропонована параметрично-орієнтована модель мобільності створює узагальнену рамку для опису евакуаційних

процесів, однак її практичне застосування потребує подальшого розвитку, насамперед у частині кількісного визначення та валідації параметрів. У цьому контексті ключовим напрямом подальших досліджень є побудова емпірично обґрунтованих залежностей для всіх введених коефіцієнтів, зокрема

Виведення значень зазначених коефіцієнтів доцільно здійснювати на основі поєднання аналізу вже наявних експериментальних даних (у тому числі результатів досліджень евакуації, відеоспостережень, статистики поведінки людей у надзвичайних ситуаціях) та проведення спеціалізованих експериментів. Останні можуть включати натурні та напівнатурні дослідження руху людей із різними характеристиками мобільності, зокрема осіб із протезами нижніх кінцівок, користувачів допоміжних засобів пересування, а також сценаріїв асистованої евакуації. Важливим завданням є також калібрування параметрів моделі на основі імітаційного моделювання з подальшим порівнянням отриманих результатів із реальними або експериментальними даними.

Окрему увагу доцільно приділити дослідженню взаємозв'язків між параметрами, зокрема впливу організованості потоку на ефективність асистованого переміщення, а також залежності поведінкових характеристик від типу об'єкта, рівня інформованості та стадії розвитку пожежі. Це дозволить уточнити модель і забезпечити її більшу адекватність реальним умовам.

Разом із тим запропонована модель має певні обмеження. По-перше, вона базується на припущенні відносної незалежності параметрів, що в реальних умовах може не повністю виконуватися через складні кореляційні зв'язки між фізіологічними та поведінковими характеристиками людей. По-друге, модель є макроскопічною за своєю природою та не враховує детальні мікродинамічні взаємодії між окремими індивідами, такі як локальні конфлікти або утворення кластерів. По-третє, точність моделі суттєво залежить від коректності

оцінювання коефіцієнтів, що на початковому етапі може мати апроксимаційний характер.

Незважаючи на зазначені обмеження, модель має значний потенціал для застосування при аналізі змішаних евакуаційних потоків. Використання інтегрального коефіцієнта мобільності дозволяє описати кожного учасника потоку як елемент із індивідуальними характеристиками, що, у свою чергу, дає змогу формувати узагальнені показники для всього потоку. Зокрема, середня швидкість руху може визначатися як функція розподілу у групі, а структура потоку – як композиція осіб із різними параметрами.

Крім того, введення параметрів, що характеризують займаний простір та маневреність, створює передумови для врахування щільності потоку та її впливу на швидкість руху. У межах подальшого розвитку моделі доцільно інтегрувати її з відомими залежностями типу “швидкість-щільність”, що дозволить описувати процеси утворення заторів, зниження пропускної здатності та виникнення критичних режимів руху. Особливо перспективним є використання моделі в імітаційних системах, де параметричний опис мобільності може бути безпосередньо інтегрований у поведінкові алгоритми агентів.

Висновки та напрями подальших досліджень. За результатами аналізу наявних класифікацій груп мобільності встановлено, що традиційні підходи не дають змоги якісно враховувати параметри осіб, які використовують допоміжні засоби пересування, протези нижніх кінцівок, а також сценарії асистованого переміщення. Обґрунтовано, що основним недоліком є дискретний характер класифікацій, який не дозволяє адекватно врахувати різноманіття функціональних станів людини та їх вплив на швидкість і структуру потоку.

Розроблено параметрично-орієнтовану концепцію класифікації мобільності, у межах якої запропоновано поєднання трьох узагальнених груп за кінематикою руху та систему кількісних

параметрів. Показано, що детальний опис мобільності забезпечується через систему коефіцієнтів, які відображають фізичну працездатність, вікові особливості, використання допоміжних засобів і протезів, а також поведінкові характеристики. Додатково введено коефіцієнт асистованості, який дозволяє кількісно врахувати ефективність колективного переміщення осіб, що не здатні до самостійного руху.

Обґрунтовано можливість практичного застосування запропонованої моделі для аналізу змішаних евакуаційних потоків та різних сценаріїв руху населення.

Показано, що використання інтегрального коефіцієнта мобільності дозволяє формувати узагальнені характеристики потоку на основі індивідуальних параметрів його учасників, а також враховувати вплив організованості руху.

Запропонована модель виступає як базова концептуальна платформа, що поєднує простоту класифікації з гнучкістю параметричного опису, та створює підґрунтя для подальших досліджень, спрямованих на підвищення точності та практичної придатності методів розрахунку евакуації при пожежі.

Конфлікт інтересів. Борисова А.С. є випусковим редактором журналу «Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека», тому розгляд рукопису та рішення про його публікацію забезпечувалися іншими членами редакційної колегії повністю незалежно.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. NFPA 101: Life Safety Code. 2021 edition. Quincy, MA : National Fire Protection Association, 2021. 556 p.
2. ISO 21542:2021. Building construction — Accessibility and usability of the built environment. Second edition. Geneva : ISO, 2021. 237 p.
3. EN 81-70:2018. Safety rules for the construction and installation of lifts — Particular applications for passenger and goods passenger lifts. Part 70: Accessibility to lifts for persons including persons with disability. Brussels : CEN, 2018. 48 p.
4. ДСТУ 8828:2019. Пожежна безпека. Загальні положення. [Чинний від 2020-01-01]. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 163 с.
5. Kuligowski E. D., Peacock R. D., Averill J. D. Pedestrian and evacuation dynamics. New York: Springer, 2011. DOI: 10.1007/978-1-4419-9725-8
6. Seyfried A., Steffen B., Klingsch W., Boltes M. The fundamental diagram of pedestrian movement revisited // Journal of Statistical Mechanics. 2005. DOI: 10.1088/1742-5468/2005/10/P10002
7. Stair evacuation of older adults and people with mobility impairments / E. Kuligowski, R. Peacock, E. Wiess, B. Hoskins. Fire Safety Journal. 2013. Vol. 62. P. 230–237. DOI: 10.1016/j.firesaf.2013.09.027.
8. Modelling total evacuation strategies for high-rise buildings / E. Ronchi, D. Nilsson. Building Simulation. 2013. Vol. 7, № 1. P. 73–87. DOI: 10.1007/s12273-013-0132-0.
9. Жезло-Хлевна Н., Хлевной О., Назар Ю., Борзов Ю., Довбняк В. Евакуація осіб із модульними протезами нижніх кінцівок при пожежі: сучасний стан, проблеми та перспективи досліджень. Пожежна безпека. Львів, 2025. № 46. С. 53–64. <https://doi.org/10.32447/20786662.46.2025.05>
10. Хлевной О., Жезло-Хлевна Н., Доценко О., Борисова А., Калиновський А. Біомеханічні особливості руху осіб із двосторонніми протезами нижніх кінцівок під час евакуації в умовах пожежі. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. Київ, 2025. № 1(19). С. 120–128. <https://doi.org/10.52363/nvcs.2025>.

REFERENCES

1. National Fire Protection Association. (2021). NFPA 101: Life Safety Code.
2. International Organization for Standardization. (2021). Building construction — Accessibility and usability of the built environment (ISO Standard No. 21542:2021). iso.org.
3. European Committee for Standardization. (2018). Safety rules for the construction and installation of lifts — Particular applications for passenger and goods passenger lifts — Part 70: Accessibility to lifts for persons including persons with disability (Standard No. EN 81-70:2018).
4. State Standard of Ukraine 8828:2019. (2019). Fire safety. General provisions. Kyiv: UkrNDNC.
5. Kuligowski, E. D., Peacock, R. D., & Averill, J. D. (2011). Pedestrian and evacuation dynamics. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9725-8>.
6. Seyfried, A., Steffen, B., Klingsch, W., & Boltes, M. (2005). The fundamental diagram of pedestrian movement revisited. Journal of Statistical Mechanics. <https://doi.org/10.1088/1742-5468/2005/10/P10002>.
7. Kuligowski, E. D., & Hoskins, B. (2012). Analysis of evacuation of people with mobility impairments. Fire Technology. <https://doi.org/10.1007/s10694-011-0214-6>.
8. Ronchi, Enrico & Nilsson, Daniel. (2013). Modelling total evacuation strategies for high-rise buildings. Building Simulation. 7. 1-15. 10.1007/s12273-013-0132-9.
9. Zhezlo-Khlevna, N., Khlevnoi, O., Nazar, Y., Borzov, Y., & Dovbniak, V. (2025). Evacuation of persons with modular lower limb prostheses in case of fire: current state, problems and research prospects. Fire Safety, (46), 53–64. <https://doi.org/10.32447/20786662.46.2025.05>.

10. Khlevnoi, O., Zhezlo-Khlevna, N., Dotsenko, O., Borysova, A., & Kalynovskyi, A. (2025). Biomechanical features of movement of persons with bilateral lower limb prostheses during evacuation in fire conditions. *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*, 1(19), 120–128. <https://doi.org/10.52363/nvcz.2025>.

IMPROVING THE CLASSIFICATION OF POPULATION MOBILITY GROUPS USING A PARAMETER-ORIENTED APPROACH

O. Khlevnoi¹, N. Zhezlo-Khlevna¹, A. Borysova²

¹*Lviv State University of Life Safety, Ukraine*

²*Institute of Scientific Research on Civil Protection of the National University of Civil Protection of Ukraine
Ukraine*

KEYWORDS:

fire evacuation,
population mobility,
mobility-impaired
groups, parametric
model, evacuation
flow, wheelchairs,
lower limb
prostheses,
assistance
coefficient,
evacuation modeling.

ABSTRACT

The paper addresses a relevant scientific and applied problem of improving approaches to the classification of population mobility in the context of fire evacuation analysis. It is demonstrated that traditional methods based on discrete mobility groups (M1-M4) do not provide sufficient accuracy under modern evacuation conditions, which are characterized by high heterogeneity and a significant proportion of individuals with various functional limitations. It is substantiated that existing approaches do not adequately account for the use of assistive mobility devices, lower-limb prostheses, as well as assisted evacuation scenarios, which have become increasingly important in recent years. A parameter-oriented approach to mobility classification is proposed, combining a generalized division into three groups based on the mode of movement with a detailed description of individual characteristics through a system of quantitative coefficients. The model incorporates parameters reflecting physical capacity, age-related features, the use of assistive devices and prostheses, behavioral factors, and the level of evacuation flow organization. In addition, an assistance coefficient is introduced to quantify the effectiveness of assisted movement for individuals who are unable to move independently, depending on the mode of transportation and environmental conditions. It is shown that the proposed approach improves the adequacy of evacuation process modeling, particularly in the analysis of mixed flows and various behavioral scenarios. The model can be integrated into evacuation time calculations as well as into modern simulation systems that consider the influence of flow density on movement speed and congestion formation. Prospects for further research are associated with the experimental identification of model parameters, their validation, and adaptation to different types of buildings and evacuation conditions.

УДК. 614.8

РОЗРОБКА СТОХАСТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОПИСУ ТА ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ ГАРНІЗОНУ ДСНС

DOI: 10.52363/2518-1777-2026-21-11

Шевченко С. М.^{1*}, ORCID iD 0000-0002-6740-9252

Луцик В. В.¹, ORCID iD 0009-0003-1310-2444

Ковальов О. О.², ORCID iD 0000-0002-4974-5201

Гапоненко Ю. І.¹, ORCID iD 0000-0003-0854-5710

Змага М. І.¹, ORCID iD 0000-0003-3601-292X

*E-mail: shevchenko_serhii@nuczu.edu.ua

¹Національний університет цивільного захисту України, Україна

²ГУ ДСНС України у Харківській області, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ	АНОТАЦІЯ
Надійшла до редакції: 10.02.2026 Прийнято: 13.04.2026 Опубліковано: 30.05.2026	У статті розв'язано актуальну науково-прикладну задачу щодо підвищення ефективності управління ресурсами пожежно-рятувальних підрозділів гарнізону Державної служби України з надзвичайних ситуацій. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю оптимізації розподілу сил і засобів в умовах високої інтенсивності викликів та обмеженості ресурсного забезпечення. Об'єктом дослідження є процеси функціонування гарнізону як складної динамічної системи, що піддається впливу випадкових чинників. У роботі застосовано системно-кібернетичний підхід, у межах якого стан системи визначається динамічною взаємодією чотирьох ключових груп ресурсів: вхідних подій, особового складу, технічних засобів та матеріальних засобів. Наукова новизна дослідження полягає у розробці комплексної стохастичної математичної моделі, де функціонування підрозділів представлено у вигляді векторного випадкового процесу із залежними компонентами. Запропоновано формалізований опис поведінки одиниць ресурсів через графи переходів між імовірнісними станами. На відміну від існуючих підходів, у моделі визначено функції інтенсивності потоків переходів, які динамічно залежать від середніх значень станів інших груп ресурсів, що дозволяє врахувати ефект транзитивної взаємодії в системі. Застосування квазідетермінованого підходу (методу динаміки середніх значень) дозволило перейти від стохастичного опису до систем диференціальних рівнянь, що описують еволюцію ресурсних показників у часі. Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці алгоритму розрахунку коефіцієнтів оперативної готовності, які виступають інтегральними показниками ефективності управління. Сформовано співвідношення початкових умов для чисельного інтегрування виведених систем рівнянь, що дає змогу прогнозувати рівень готовності гарнізону за різних сценаріїв навантаження. Результати моделювання створюють науково-методичне підґрунтя для прийняття обґрунтованих управлінських рішень щодо раціонального використання сил і засобів.
КЛЮЧОВІ СЛОВА: гарнізон, ДСНС, ефективність, моделювання, оперативна готовність, пожежно-рятувальні підрозділи, стохастична модель, управління ресурсами.	

Постановка проблеми. Сучасний етап розвитку пожежно-рятувальної служби України характеризується зростанням ролі управління у забезпеченні високих показників оперативної готовності підрозділів Державної служби України з

надзвичайних ситуацій (ДСНС), їх організаційної та технічної досконалості. Умови воєнного стану та зростання кількості й масштабів негативного впливу техногенного, природного, терористичного та військового характеру створюють

додаткові загрози стабільному соціально-економічному розвитку держави та підвищують вимоги до ефективності управління ресурсами гарнізонів ДСНС. Одним із ключових завдань сучасного управління є обґрунтований вибір оптимальних рішень з урахуванням обмежених фінансових і матеріальних ресурсів, необхідності забезпечення постійної оперативної готовності сил і засобів, а також досягнення стратегічних цілей цивільного захисту. Проте в існуючій практиці управління відсутні ефективні засоби для об'єктивної оцінки результативності прийнятих управлінських рішень щодо матеріально-технічного забезпечення підрозділів ДСНС від якого залежить оперативна готовність.

Наявні підходи не забезпечують комплексного використання науково-методичних інструментів та автоматизованих систем підтримки прийняття рішень, що ускладнює оперативну обробку значних обсягів інформації та підвищує ризик помилок управління в умовах динамічної обстановки. Це зумовлює необхідність розроблення та впровадження науково-обґрунтованих методів і моделей управління ресурсами гарнізонів ДСНС, які б забезпечили підвищення ефективності діяльності територіальних та функціональних підсистем служби.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведений аналіз наукових праць показав, що проблематика управління ресурсами систем екстреного реагування залишається актуальною як в Україні, так і за кордоном. Зарубіжні дослідження останніх років демонструють зростання інтересу до математичного, стохастичного та імітаційного моделювання систем екстреного реагування. Так, Zhang, Liu та Peng [1] запропонували метод симуляційної оптимізації для управління ресурсами у стохастичних системах, що поєднує моделювання й оптимізаційні алгоритми – підхід, близький до використаного в даній роботі. Ingolfsson, Erkut і Budge [2] розробили імітаційну модель

функціонування служби реагування м. Едмонтон, засновану на чергових моделях із випадковим надходженням викликів, що дозволяє оцінити оперативність реагування залежно від дислокації сил.

Gross та ін. [3] запропонували класичну формалізацію теорії масового обслуговування (ТМО), яка використовується як аналітична основа для побудови систем диференціальних рівнянь у моделях ресурсного управління. Minas, Simpson і Greenwood [4] виконали узагальнюючий аналіз моделей реагування, довівши, що найвищу точність у прогнозуванні ефективності демонструють математичні моделі з випадковими параметрами, що узгоджується з квазідетермінованим підходом, застосованим у цій статті.

Серед українських досліджень переважають роботи, присвячені організаційно-технічним аспектам забезпечення діяльності підрозділів ДСНС, статистичному аналізу оперативних показників та оптимізації територіального розміщення пожежно-рятувальних частин. Зокрема, у роботі Новожилової та Михайловської [5] запропоновано організаційно-технічний метод формування ресурсного забезпечення реагування на надзвичайні ситуації, а Климаєв та співавтори [6] проаналізували залежність часу прибуття підрозділів від статистичних параметрів пожеж. Кустов, Федоряка та Корнієнко [7] розглянули ефективність територіального розміщення сил, проте ці підходи не враховують динаміку змін стану ресурсів у часі, що обмежує їх застосування для комплексного моделювання.

Окремо заслуговує уваги робота Runefors, Johansson та van Hees [8], у якій запропоновано цілісний підхід до розподілу ресурсів пожежних служб на основі пріоритетів безпеки, що підтверджує актуальність дослідження ефективності управління ресурсами.

Окремої уваги заслуговують результати [9], де сформовано методичний фундамент застосування методів дослідження операцій у поточному

управлінні ресурсами екстрених служб. Утім, поза увагою автора залишилися питання моделювання внутрішньої динаміки взаємозалежних ресурсних груп.

У сучасних дослідженнях [10] наголошується на необхідності створення інтелектуальних систем підтримки рішень, які здатні працювати в умовах неповної та невизначеної інформації про надзвичайні ситуації.

Формулювання цілей дослідження. Метою дослідження є підвищення ефективності управління ресурсами пожежно-рятувальних підрозділів гарнізону ДСНС шляхом розробки комплексної стохастичної моделі та методики оцінки рівня їх оперативної готовності. Мета передбачає вирішення таких цілей: розробити комплексну стохастичну модель процесу управління ресурсами гарнізону у вигляді векторного випадкового процесу із залежними компонентами для формалізованого опису динаміки ресурсів; обґрунтувати та вивести системи диференціальних рівнянь, які описують динаміку середніх значень станів усіх видів ресурсів на основі квазідетермінованого підходу; розробити методику оцінки ефективності управління ресурсами, що базується на трьохетапному алгоритмі розрахунку коефіцієнтів оперативної готовності сил і засобів; сформулювати співвідношення початкових умов для кожного виду ресурсів, що забезпечить можливість практичного чисельного інтегрування розроблених систем рівнянь.

Методи дослідження. Для опису та аналізу динаміки ресурсного забезпечення пожежно-рятувальних підрозділів застосовано комплексний системно-кібернетичний підхід, що базується на стохастичному моделюванні функціонування гарнізону як складної динамічної системи.

Стан системи моделюється за допомогою векторного випадкового процесу $X(t)$ із залежними компонентами, де кожна група ресурсів (події, особовий склад, техніка, матеріальні засоби) представлена через відповідні імовірнісні

стани. Взаємодія між компонентами формалізується за допомогою функцій інтенсивності переходів, які залежать від середніх значень станів суміжних груп ресурсів, що дозволяє врахувати ефект транзитивної залежності в умовах виконання завдань за призначенням. Перехід від імовірнісного опису окремих елементів до аналізу поведінки системи в цілому реалізовано шляхом застосування квазідетермінованого підходу (методу динаміки середніх значень). Це дозволило отримати замкнені системи диференціальних рівнянь, що описують еволюцію середніх показників ресурсів у часі. Для знаходження кількісних характеристик оперативної готовності використано методи чисельного інтегрування виведених систем рівнянь із введенням специфічних початкових умов, що визначають граничні обсяги наявних сил і засобів гарнізону.

Виклад основного матеріалу дослідження. Модель процесу управління ресурсами гарнізону ДСНС може бути побудована на основі концепції рівнянь станів, що є ключовим підходом. Якщо ми знаємо поточний стан системи (змінні стану) та вхідні сигнали, то можливо спрогнозувати її майбутню поведінку. При цьому не потрібно знати, яким чином система потрапила в цей стан, тобто, історія процесу не є обов'язковою. Якщо описати це іншими словами, то для прогнозування змін системи достатньо лише мінімальної інформації про її поточний стан [11].

Стан ресурсів гарнізону можна зобразити як вектор-стовпець, до складу якого входять змінні стани $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$. Вихідні величини - значення показників ефективності функціонування ресурсів гарнізону ДСНС, що позначаються через $y_1, y_2, \dots, y_p$ і складають вектор $y = (y_1, y_2, \dots, y_p)^T$.

На кожному системі впливають два типи вхідних показників: керовані та некеровані. Керовані показники формують вектори $u = (u_1, u_2, \dots, u_r)^T$, при цьому при вирішенні завдання управління ресурсами вони розглядаються як значення кількісного складу сил та засобів гарнізону.

Некеровані вхідні показники, хоча й не піддаються прямому управлінню, також впливають на систему. Ці показники відображають зовнішні фактори, що визначаються впливом навколишнього середовища, наприклад, частота виникнення надзвичайних ситуацій (НС), пожеж, тощо, а також тимчасові характеристики оперативної діяльності підрозділів ДСНС. Усі дані показники в загальному вигляді позначаються вектором $v = (v_1, v_2, \dots, v_m)^T$.

Головною задачею системи управління є визначення на основі наявних обчислень "у" таких керуючих впливів (кількісного складу ресурсів гарнізону ДСНС), щоб, за умов мінливої оперативної обстановки (впливу збурень "v"), система функціонувала з необхідною ефективністю.

Цей підхід об'єднує різні показники ефективності функціонування системи гарнізону ДСНС в єдину цілісну картину. Вони враховують змінні стани ресурсів гарнізону, які змінюються залежно від часу та ситуації, а також оперативну обстановку та ситуацію з пожежами на території, що контролюється гарнізоном. Крім того, важливою складовою є можливість управління системою. Усі ці фактори працюють разом, щоб досягти конкретних цілей, визначених для певного гарнізону ДСНС.

Динаміка процесу управління ресурсами гарнізону ДСНС може описуватися векторним випадковим процесом $X(t)$ із залежними компонентами:

$$\begin{aligned} X(t) &= Y(t), Z(t), W(t), V(t), \\ Y(t) &= Y_1(t), Y_2(t), \dots, Y_R(t), \\ Z(t) &= Z_1(t), Z_2(t), \dots, Z_L(t), \\ W(t) &= W_1(t), W_2(t), \dots, W_J(t), \\ V(t) &= V_1(t), V_2(t), \dots, V_G(t). \end{aligned} \quad (1)$$

де $Y_r(t)$ - цілісний випадковий процес, що описує кількість і стадії виникнення подій на території, контрольованій гарнізоном ДСНС, де r - вид події (наприклад, пожежі різних номерів виклику, НС, ДТП та ін.), $r = 1, 2, \dots, R$;

$Z_l(t)$ - випадковий процес, що описує діяльність особового складу, де l - призначення (спеціалізація) особового складу (наприклад, начальник караулу, командир відділення, водій, ствольник та ін.), $l = 1, 2, \dots, L$;

$W_j(t)$ - цілочисленний випадковий процес, що описує використання невитратних засобів (пожежна та рятувальна техніка, засоби зв'язку та управління), де j - вид техніки (основні, спеціальні пожежні автомобілі і т.д.), $j = 1, 2, \dots, J$;

$V_g(t)$ - цілісний випадковий процес, що описує використання коштів, де g - вид засобу, що витрачається (паливно-мастильні матеріали, вогнегасні порошки та ін.), $g = 1, 2, \dots, G$.

Загальну кількість наявних ресурсів у гарнізоні ДСНС задаємо векторами:

$$N^{(l)} = (N_1^{(l)}, N_2^{(l)}, \dots, N_L^{(l)}),$$

де $N_i^{(l)}$ - кількість особового складу виду i ;

$$N^{(j)} = (N_1^{(j)}, N_2^{(j)}, \dots, N_J^{(j)}),$$

де $N_i^{(j)}$ - кількість невитратних засобів виду i ;

$$N^{(g)} = (N_1^{(g)}, N_2^{(g)}, \dots, N_G^{(g)}),$$

де $N_i^{(g)}$ - кількість коштів виду i .

Взаємодія складових процесу $X(t)$ полягає в тому, що зміни в одному з елементів впливають на інші. Інтенсивність переходів між різними станами кожної складової залежить не тільки від її власних характеристик, а й від характеристик інших складових. Тобто, процес управління ресурсами гарнізону ДСНС є комплексним, і для правильного реагування потрібно враховувати, як зміни в одній частині системи можуть вплинути на інші [8].

Вважатимемо, що складові процесу $X(t)$ є однорідними розкладанням цілих значень випадкового процесу:

$$Y_r(t) = \sum_{k=1}^{N_r^{(r)}} y_k^{(r)}(t), r = 1, \dots, R, \quad (2)$$

Де $N_r^{(r)}$ - максимально можливе число одночасних подій категорії r (наприклад, пожежі, надзвичайні ситуації, ДТП тощо);

$(y)_k^{(r)} = y_0^{(r)}, y_1^{(r)}, \dots, y_{(n_y)}^{(r)}$ випадкове блукання по певній множині станів для кожної події категорії r і є елементарним цілочисельним випадковим процесом, який описує стадії виникнення та ліквідації події;

$n_y + 1$ - кількість можливих станів (стадії виникнення та ліквідації) однієї події.

$$Z_l(t) = \sum_{k=1}^{N_l^{(l)}} Z_k^{(l)}(t), l = 1, \dots, L, \quad (3)$$

де $Z_k^{(l)} = \{Z_0^{(l)}, Z_1^{(l)}, \dots, Z_{n_l}^{(l)}\}$ випадкове блукання по певній множині станів однієї одиниці особового складу виду l і є елементарним цілим випадковим процесом (наприклад, начальник караулу, командир відділення, водій тощо);

$(n_l + 1)$ - кількість можливих станів однієї одиниці особового складу виду l ;

$$W_j(t) = \sum_{k=1}^{N_j^{(j)}} w_k^{(j)}(t), j = 1, \dots, J, \quad (4)$$

де $w_k^{(j)} = \{w_0^{(j)}, w_1^{(j)}, \dots, w_{n_j}^{(j)}\}$ випадкове блукання по певній множині станів однієї одиниці невитратного засобу виду j і є елементарним цілим випадковим процесом (пожежний техніка, засоби зв'язку і т.д.);

$(n + 1)$ - кількість можливих станів для кожної одиниці невитратного засобу виду j ;

$$V_g(t) = \sum_{k=1}^{N_g^{(g)}} v_k^{(g)}(t), g = 1, \dots, G, \quad (5)$$

де $v_k^{(g)} = \{v_0^{(g)}, v_1^{(g)}, \dots, v_{n_g}^{(g)}\}$ випадкове блукання по певній множині станів однієї одиниці витрачених коштів виду g і є елементарним цілочисловим випадковим процесом;

$(n + 1)$ - кількість можливих станів для однієї одиниці витрачених коштів виду g .

Враховуючи всі розглянуті процеси всередині кожної з груп, то можемо вважати, що вони функціонують незалежно, але статистично однаково, тому приймемо

$\sum_{k=1}^{N_r^{(r)}} y_k^{(r)}(t), \sum_{k=1}^{N_l^{(l)}} z_k^{(l)}(t), \sum_{k=1}^{N_j^{(j)}} w_k^{(j)}(t), \sum_{k=1}^{N_g^{(g)}} v_k^{(g)}(t)$ однорідним канонічним розкладанням відповідних складових процесу $X(t)$. Взаємодія складових процесу $X(t)$ є транзитивною і визначається графом, що представлено на рис. 1.

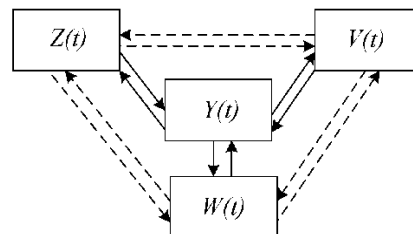


Рисунок 1 – Граф процесу $X(t)$

Для прикладу, під час гасіння пожежі її інтенсивність гасіння буде залежати від рангу пожежі, з одного боку, а з іншого боку - від ефективності роботи пожежних підрозділів, що прибули на гасіння, у тому числі й від кількості пожежних відділень, що були залучені. Тому стосовно проведення процесу гасіння процес $Y(t)$ управляється процесом $W(t)$. Інтенсивність виклику пожежних відділень на будь-яку пожежу (що відноситься до території певної пожежної частини) також залежить як від рангу виклику, що вимагає певну кількість ресурсів на його ліквідацію, так і від кількості вільних відділень, і тому в плані потреби в обслуговуванні процес $Y(t)$ управляє процесом $W(t)$.

Зрозуміло, що процеси $Y(t)$ і $Z(t)$, $Z(t)$ і $W(t)$, $W(t)$ і $V(t)$ є аналогічними до попереднього. Приймаючи далі принцип лінійної взаємодії між складовими процесу $X(t)$ розглянемо докладніше випадкового блукання елементарних одиниць процесів $Y(t)$, $Z(t)$, $W(t)$, $V(t)$ за множинами своїх станів.

Для розробки комплексної математичної моделі процесу функціонування гарнізону ДСНС необхідно внести такі вихідні дані:

$\lambda_{nr} = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_R)$ - частота виникнення подій на території, що знаходиться під контролем гарнізону ДСНС (необхідно пам'ятати, що в загальному вигляді всі елементи вектора

λ_{np} - це функції часу, де r -інтенсивність пожеж номеру виклику r , $r = 1, 2, \dots, R$;

$$a = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1L} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2L} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{R1} & a_{R2} & \dots & a_{RL} \end{pmatrix} -$$

матриця, що відображає потребу у кількості особового складу для гасіння та ліквідації пожеж, ліквідації НС тощо, де a_{RL} - середня кількість необхідних одиниць особового складу виду l при настанні події r ;

$$b = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1J} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2J} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ b_{R1} & b_{R2} & \dots & b_{RJ} \end{pmatrix} -$$

матриця, що відображає потребу невитратних технічних коштів, де b_{RJ} - середня кількість необхідних коштів виду j при настанні події r ;

$$c = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1G} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2G} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ c_{R1} & c_{R2} & \dots & c_{RG} \end{pmatrix}$$

– матриця, що відображає потребу технічних засобів, де c_{RG} - середня кількість необхідних коштів виду g при настанні події r ;

$$T = \begin{pmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} & t_{14} & t_{15} & t_{16} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} & t_{24} & t_{25} & t_{26} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ t_{R1} & t_{R2} & t_{R3} & t_{R4} & t_{R5} & t_{R6} \end{pmatrix}$$

– матриця, що відображає тимчасові характеристики гасіння та ліквідації пожеж, де t_{R1} - середній час прямування до місця пожежі (при пожежі номеру виклику r); t_{R2} - середній час розвідки місця пожежі номеру виклику r ; t_{R3} - середній час проведення АРР (при пожежі номеру виклику r); t_{R4} - середній час розгортання сил та засобів (при пожежі номеру виклику r); t_{R5} - середній час ліквідації горіння (при пожежі номеру виклику r); t_{R6} - середній час проведення спеціальних робіт (при пожежі номеру виклику r);

Усі наведені вище показники можна визначити, використовуючи статистичні дані за минулий період для прогнозування їх у майбутньому.

Розглянемо детально складові процесу $X(t)$ з урахування вище наведеної інформації.

Процесу $Y_r(t)$ характерні такі ймовірні стани (рис. 2):

$y_0^{(r)}$ - відсутність подій на території, що контролюється r ;

$y_1^{(r)}$ - стан, коли на контрольованій території виникла подія r ;

$y_2^{(r)}$ - стан, що визначає фазу активної ліквідації події r .

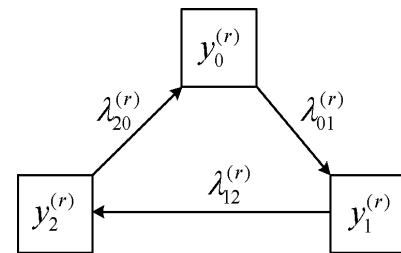


Рисунок 2 – Граф станів процесу $Y_r(t)$

Інтенсивності потоків, що трансформують процес з одного стану в інший, мають такий фізичний зміст:

$\lambda_{01}^{(r)}$ - Інтенсивність потоку вимог на обслуговування (події r), що породжується однією одиницею з максимального можливого числа одночасних подій r , $\lambda_{01}^{(r)} = \lambda_r / m_{y_0}^{(r)}$;

$\lambda_{12}^{(r)}$ - Інтенсивність потоку прийняття на обслуговування, визначається так:

$$\lambda_{12}^{(r)} = \varphi_y(m_{y_1}^{(r)}; m_{w_0}^{(j)}) = \begin{cases} \frac{1}{t_{r1}}, \text{ за умови } m_{w_0}^{(j)} \geq b_{r1} \cdot m_{y_1}^{(r)} \\ \frac{1}{t_{r1}} \cdot \frac{m_{w_0}^{(j)}}{b_{r1} \cdot m_{y_1}^{(r)}}, \text{ за умови } m_{w_0}^{(j)} < b_{r1} \cdot m_{y_1}^{(r)}, \end{cases} \quad (6)$$

де $m_{y_1}^{(r)}$, $m_{w_0}^{(j)}$ - середні значення елементів, що знаходяться в відповідному стані (див. нижче); $\lambda_{20}^{(r)} = \frac{1}{\sum_{i=2}^6 t_{ri}}$

$\lambda_{20}^{(r)}(t)$ - інтенсивність ліквідації події у процесі $Y_r(t)$, що характеризує середній темп переходу події зі стану активної фази до завершення.

Подальше моделювання стосується процесу $Z^l(t)$, який описує зміну станів одиниці особового складу виду l у часі. Для

кожної одиниці особового складу виду 1 можливі такі стани (рис. 3):

$z_0^{(l)}$ - перебуває у режимі оперативного чергування;

$z_1^{(l)}$ - перебуває у режимі слідування до місця події;

$z_2^{(l)}$ - перебуває у режимі проведення розвідки місця події;

$z_3^{(l)}$ - перебуває у режимі проведення АРР;

$z_4^{(l)}$ - перебуває у режимі розгортання сил та засобів ;

$z_5^{(l)}$ - бере участь у ліквідації події;

$z_6^{(l)}$ - виконує спеціальні роботи;

$z_7^{(l)}$ - перебуває у стані згортання сил і засобів та повернення до місця постійної дислокації.

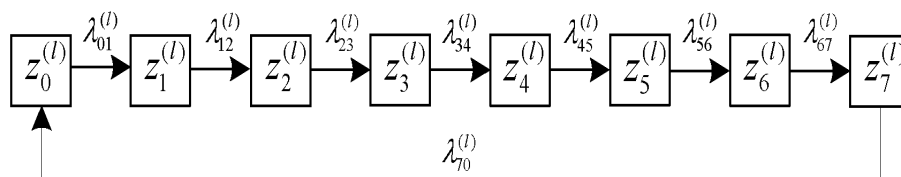


Рисунок 3 – Граф станів одиниці особового складу

Задля визначення інтенсивності викликів $\lambda_{01}^{(l)}$ одиниці особового складу виду 1 розглянемо функцію $\varphi_z(m_{y_1}^{(1)}, m_{y_1}^{(2)}, \dots, m_{y_1}^{(R)}, m_{z_0}^{(1)})$. З неї можна зробити висновок, що при зростанні числа подій $m_{y_1}^{(1)}, m_{y_1}^{(2)}, \dots, m_{y_1}^{(R)}$ сумарна інтенсивність викликів особового складу виду 1 буде визначатися із співвідношення $\sum_{r=1}^R \lambda_r \cdot a_{rl}$ та лінійно зростатиме до того моменту, поки буду залишатися вільні одиниці особового складу виду 1, тобто. поки буде виконуватися умова $m_{z_0}^{(l)} \geq \sum_{r=1}^R a_{rl} \cdot m_{y_1}^{(r)}$. У такому випадку середня інтенсивність викликів, що припадає на одиницю особового складу виду 1 буде розраховуватися із співвідношення

$$\frac{\sum_{r=1}^R \lambda_r \cdot a_{rl}}{m_{z_0}^{(l)}}. \quad (7)$$

Якщо $m_{z_0}^{(l)} < \sum_{r=1}^R a_{rl} \cdot m_{y_1}^{(r)}$ середня інтенсивність викликів більша за одиницю

особового складу виду 1, тоді вона множиться на множник $\frac{m_{z_0}^{(l)}}{\sum_{r=1}^R a_{rl} \cdot m_{y_1}^{(r)}}$, і буде розраховуватися:

$$\frac{\sum_{r=1}^R \lambda_r \cdot a_{rl}}{m_{z_0}^{(l)}} \cdot \frac{m_{z_0}^{(l)}}{\sum_{r=1}^R a_{rl} \cdot m_{y_1}^{(r)}} = \frac{\sum_{r=1}^R \lambda_r \cdot a_{rl}}{\sum_{r=1}^R a_{rl} \cdot m_{y_1}^{(r)}}, \quad (8)$$

Таким чином, середня інтенсивність потоку викликів одиниці особового складу виду 1:

$$\lambda_{01}^{(l)} = \varphi_z(m_{y_1}^{(1)}, m_{y_1}^{(2)}, \dots, m_{y_1}^{(R)}, m_{z_0}^{(l)}) = \begin{cases} \frac{\sum_{r=1}^R \lambda_r \cdot a_{rl}}{m_{z_0}^{(l)}}, \text{ за умови } m_{z_0}^{(l)} \geq \sum_{r=1}^R a_{rl} \cdot m_{y_1}^{(r)} \\ \frac{\sum_{r=1}^R \lambda_r \cdot a_{rl}}{\sum_{r=1}^R a_{rl} \cdot m_{y_1}^{(r)}}, \text{ за умови } m_{z_0}^{(l)} < \sum_{r=1}^R a_{rl} \cdot m_{y_1}^{(r)} \end{cases}, \quad (9)$$

Середні значення інтенсивності переходів між різними станами однієї одиниці особового складу виду 1 визначаються із співвідношень:

$$\lambda_{12}^{(l)} = \lambda_{70}^{(l)} = \frac{1}{t_1^l} = \frac{\sum_{r=1}^R a_{rl} \cdot m_{y_2}^{(r)}}{\sum_{r=1}^R a_{rl} \cdot m_{y_2}^{(r)} \cdot t_{r1}}, \lambda_{23}^{(l)} = \frac{1}{t_2^l} = \frac{\sum_{r=1}^R a_{rl} \cdot m_{y_2}^{(r)}}{\sum_{r=1}^R a_{rl} \cdot m_{y_2}^{(r)} \cdot t_{r2}},$$

$$\lambda_{34}^{(l)} = \frac{1}{t_3^l} = \frac{\sum_{r=1}^R a_{rl} \cdot m_{y_2}^{(r)}}{\sum_{r=1}^R a_{rl} \cdot m_{y_2}^{(r)} \cdot t_{r3}}, \lambda_{45}^{(l)} = \frac{1}{t_4^l} = \frac{\sum_{r=1}^R a_{rl} \cdot m_{y_2}^{(r)}}{\sum_{r=1}^R a_{rl} \cdot m_{y_2}^{(r)} \cdot t_{r4}}, \quad (10)$$

$$\lambda_{56}^{(l)} = \frac{1}{t_5^l} = \frac{\sum_{r=1}^R a_{rl} \cdot m_{y_2}^{(r)}}{\sum_{r=1}^R a_{rl} \cdot m_{y_2}^{(r)} \cdot t_{r5}}, \lambda_{67}^{(l)} = \frac{1}{t_6^l} = \frac{\sum_{r=1}^R a_{rl} \cdot m_{y_2}^{(r)}}{\sum_{r=1}^R a_{rl} \cdot m_{y_2}^{(r)} \cdot t_{r6}}.$$

Граф станів одиниці невитратних технічних засобів зображений на рис. 4.

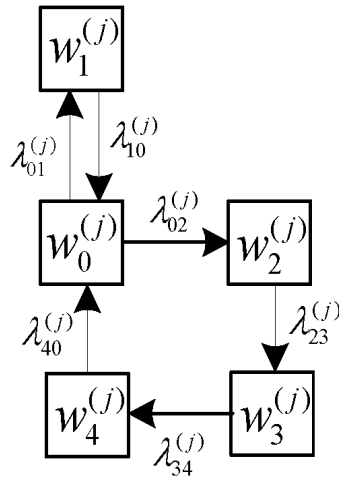


Рисунок 4 – Граф станів одиниці невитратного технічного засобу

$W_0^{(j)}$ - одиниця невитратного засобу, який знаходиться у підрозділі та не використовується;

$W_1^{(j)}$ - одиниця невитратного засобу вийшла з ладу та ремонтується;

$W_2^{(j)}$ - одиниця невитратного засобу отримала виклик і прямує на пожежу;

$W_3^{(j)}$ - одиниця невитратного засобу використовується на пожежі;

$W_4^{(j)}$ - одиниця невитратного засобу повертається в підрозділ (у разі якщо одиниця засобу вийшла з ладу у станах $W_2^{(j)}, W_3^{(j)}, W_4^{(j)}$, вона однаково повертається у підрозділ і надходить у ремонт);

Інтенсивності потоків переходу між станами одиниці невитратного засобу виду j :

$$\lambda_{01}^{(j)} = \lambda_j^{\text{рем}} \cdot \frac{N_j^{(j)} - m_{w_1}^{(j)}}{N_j^{(j)}} \quad (11)$$

де $\lambda_j^{\text{рем}}$ - частота ремонту одиниці невитратного засобу виду j ;

$\lambda_{10}^{(j)} = 1/t_j^{\text{рем}}$ де $t_j^{\text{рем}}$ - середній час відновлення у справний стан одиниці засобу виду j (інформація отримується з статистичних даних за минулий період).

Для визначення інтенсивності $\lambda_{02}^{(j)}$ викликів одиниці невитратного технічного засобу виду j потрібно ввести функцію $\varphi_j(m_{y_1}^{(1)}, m_{y_1}^{(2)}, \dots, m_{y_1}^{(R)}, m_{w_0}^{(j)})$. Якщо відбувається зростання кількості подій $m_{y_1}^{(1)}, m_{y_1}^{(2)}, \dots, m_{y_1}^{(R)}$, то сумарна інтенсивність викликів невитратних технічних засобів виду j визначатиметься співвідношенням $\sum_{r=1}^R \lambda_r \cdot b_{rj}$ та буде лінійно зростати до моменту, доки залишатимуться вільні одиниці невитратних засобів виду j , тобто. поки виконується умова $m_{w_0}^{(j)} \geq \sum_{r=1}^R b_{rj} \cdot m_{y_1}^{(r)}$. У такому випадку середня інтенсивність викликів для однієї одиниці невитратних технічних засобів виду j буде визначатись із співвідношення:

$$\frac{\sum_{r=1}^R \lambda_r \cdot b_{rj}}{m_{w_0}^{(j)}} \quad (12)$$

Якщо виконується умова $m_{w_0}^{(j)} < \sum_{r=1}^R b_{rj} \cdot m_{y_1}^{(r)}$, то середня інтенсивність викликів на одну одиницю невитратних технічних засобів виду j множиться на множник $\frac{m_{w_0}^{(j)}}{\sum_{r=1}^R b_{rj} \cdot m_{y_1}^{(r)}}$:

$$\frac{m_{w_0}^{(j)}}{\sum_{r=1}^R b_{rj} \cdot m_{y_1}^{(r)}} = \frac{\sum_{r=1}^R \lambda_r \cdot b_{rj}}{\sum_{r=1}^R b_{rj} \cdot m_{y_1}^{(r)}}$$

Таким чином, середня інтенсивність потоку викликів одиниці невитратних технічних засобів виду j :

$$\lambda_{02}^{(j)} = \varphi_j(m_{y_1}^{(1)}, m_{y_1}^{(2)}, \dots, m_{y_1}^{(R)}, m_{w_0}^{(j)}) =$$

$$\begin{cases} \frac{\sum_{r=1}^R \lambda_r \cdot b_{rj}}{m_{w_0}^{(j)}}, \text{ за умови } m_{w_0}^{(j)} \geq \sum_{r=1}^R b_{rj} \cdot m_{y_1}^{(r)} \\ \frac{\sum_{r=1}^R \lambda_r \cdot b_{rj}}{\sum_{r=1}^R b_{rj} \cdot m_{y_1}^{(r)}}, \text{ за умови } m_{w_0}^{(j)} < \sum_{r=1}^R b_{rj} \cdot m_{y_1}^{(r)} \end{cases} \quad (13)$$

Середні значення інтенсивності переходів між станами однієї одиниці

невитратних технічних засобів виду j визначаються із співвідношень:

$$\lambda_{23}^{(j)} = \lambda_{40}^{(j)} = \frac{1}{t_1} = \frac{1}{\sum_{r=1}^R b_{rj} \cdot m_{y_1}^{(r)} \cdot t_{r1}}, \quad \lambda_{34}^{(j)} = \frac{1}{t_{\text{вит}}} = \frac{1}{\sum_{i=2}^6 t_{\text{ych}}^j} \quad (14)$$

де $t_{\text{вит}}^j$ - сумарний середній час використання протягом виїзду одиниці невитратних технічних засобів виду j ,

$$\begin{aligned} \overline{t_{\text{ych}}^j} &= \sum_{i=2}^6 \overline{t_i^j} = \overline{t_2^j} + \overline{t_3^j} + \overline{t_4^j} + \overline{t_5^j} + \overline{t_6^j} = \frac{b_{1j} \cdot m_{y_2}^{(1)} \cdot t_{12} + \dots + b_{Rj} \cdot m_{y_2}^{(R)} \cdot t_{R2}}{b_{1j} \cdot m_{y_2}^{(1)} + \dots + b_{Rj} \cdot m_{y_2}^{(R)}} + \\ &+ \frac{b_{1j} \cdot m_{y_2}^{(1)} \cdot t_{13} + \dots + b_{Rj} \cdot m_{y_2}^{(R)} \cdot t_{R3}}{b_{1j} \cdot m_{y_2}^{(1)} + \dots + b_{Rj} \cdot m_{y_2}^{(R)}} + \dots + \frac{b_{1j} \cdot m_{y_2}^{(1)} \cdot t_{16} + \dots + b_{Rj} \cdot m_{y_2}^{(R)} \cdot t_{R6}}{b_{1j} \cdot m_{y_2}^{(1)} + \dots + b_{Rj} \cdot m_{y_2}^{(R)}} = \\ &= \frac{\sum_{r=1}^R b_{rj} \cdot m_{y_2}^{(r)} \cdot (\sum_{i=2}^6 t_{ri})}{\sum_{r=1}^R (b_{rj} \cdot m_{y_2}^{(r)} \cdot (\sum_{i=2}^6 t_{ri}))} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\text{Звідки } \lambda_{34}^{(j)} = \frac{1}{t_{\text{ych}}^j} = \frac{\sum_{r=1}^R b_{rj} \cdot m_{y_2}^{(r)}}{\sum_{r=1}^R (b_{rj} \cdot m_{y_2}^{(r)} \cdot \sum_{i=2}^6 t_{ri})}.$$

Граф станів одиниці технічних засобів, що витрачаються зображено на рис. 5.

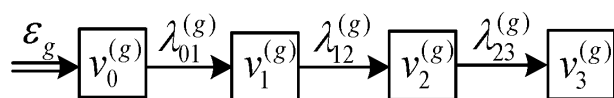


Рисунок 5 – Граф станів одиниці технічного засобу, що витрачається.

На даному графі зображені стани та інтенсивності переходів:

$v_0^{(g)}$ - одиниця витраченого засобу виду g знаходиться у підрозділі та не використовується;

$v_1^{(g)}$ - одиниця витраченого засобу виду g , яка необхідна для виконання задач;

$v_2^{(g)}$ - одиниця витраченого засобу виду g бере участь у обслуговуванні;

$v_3^{(g)}$ - одиниця витраченого засобу виду g списана;

E_g - інтенсивність поповнення запасу витрачених засобів виду g .

Для визначення інтенсивності $\lambda_{01}^{(g)}$ використання одиниці витраченого засобу

виду g необхідно ввести функцію $\varphi_g(m_{y_1}^{(1)}, m_{y_1}^{(2)}, \dots, m_{y_1}^{(R)}, m_{y_0}^{(g)})$. З якої можна зробити висновки, що у разі зростання кількості подій $m_{y_1}^{(1)}, m_{y_1}^{(2)}, \dots, m_{y_1}^{(R)}$ сумарна інтенсивність використання коштів виду g буде визначатися із співвідношення $\sum_{r=1}^R \lambda_r \cdot c_{rg}$ і лінійно зростатиме до моменту, доки залишатимуться вільні одиниці коштів виду g , тобто. поки буде виконуватися умова $m_{v_0}^{(g)} \geq \sum_{r=1}^R c_{rg} \cdot m_{y_1}^{(r)}$. Тоді середня інтенсивність викликів, що припадає на одну одиницю витрачених коштів виду g буде визначатися із співвідношення $\frac{\sum_{r=1}^R \lambda_r \cdot c_{rg}}{m_{v_0}^{(g)}}$.

Якщо $m_{v_0}^{(g)} < \sum_{r=1}^R c_{rg} \cdot m_{y_1}^{(r)}$, то середня інтенсивність викликів на одну одиницю витрачених коштів виду g множиться на множник $\frac{m_{v_0}^{(g)}}{\sum_{r=1}^R c_{rg} \cdot m_{y_1}^{(r)}}$:

$$\frac{\sum_{r=1}^R \lambda_r \cdot c_{rg}}{m_{v_0}^{(g)}} \cdot \frac{m_{v_0}^{(g)}}{\sum_{r=1}^R c_{rg} \cdot m_{y_1}^{(r)}} = \frac{\sum_{r=1}^R \lambda_r \cdot c_{rg}}{\sum_{r=1}^R c_{rg} \cdot m_{y_1}^{(r)}} \quad (16)$$

Таким чином, середня інтенсивність потоку використання одиниці коштів виду g:

$$\lambda_{01}^{(s)} = \varphi_s(m_{y_1}^{(1)}, m_{y_1}^{(2)}, \dots, m_{y_1}^{(R)}, m_{y_0}^{(s)}) = \begin{cases} \frac{\sum_{r=1}^R \lambda_r \cdot c_{rg}}{m_{y_0}^{(s)}}, \text{ за умови } m_{y_0}^{(s)} \geq \sum_{r=1}^R c_{rg} \cdot m_{y_1}^{(r)} \\ \frac{\sum_{r=1}^R \lambda_r \cdot c_{rg}}{\sum_{r=1}^R c_{rg} \cdot m_{y_1}^{(r)}}, \text{ за умови } \sum_{r=1}^R c_{rg} \cdot m_{y_1}^{(r)} \end{cases} \quad (17)$$

Середнє значення інтенсивності транспортування витрачених засобів виду g

на місце події: $\lambda_{12}^{(g)} = \frac{1}{t_1^g} = \frac{\sum_{r=1}^R c_{rg} \cdot m_{y_1}^{(r)}}{\sum_{r=1}^R c_{rg} \cdot m_{y_1}^{(r)} \cdot t_{r1}}$.

Для процесу $Y_r(t), r = 1, 2, \dots, R$

$$\begin{cases} \left(\frac{dm_{y_0}^{(r)}}{dt} \right) = -\lambda_{01}^{(r)} \cdot m_{y_0}^{(r)} + \lambda_{20}^{(r)} \cdot m_{y_1}^{(r)} \\ \left(\frac{dm_{y_1}^{(r)}}{dt} \right) = \lambda_{01}^{(r)} \cdot m_{y_0}^{(r)} - \lambda_{12}^{(r)} \cdot m_{y_1}^{(r)} \\ \left(\frac{dm_{y_2}^{(r)}}{dt} \right) = \lambda_{12}^{(r)} \cdot m_{y_1}^{(r)} - \lambda_{20}^{(r)} \cdot m_{y_2}^{(r)} \end{cases} \quad (19)$$

з умовою нормування: $m_{y_0}^{(r)} + m_{y_1}^{(r)} + m_{y_2}^{(r)} = N_r$,

і початковими умовами: $m_{y_0}^{(r)}(0) = N_r, m_{y_1}^{(r)}(0) = m_{y_2}^{(r)}(0) = 0, r = 1, 2, \dots, R$.

Для особового складу (процесу $Z_l(t), l = 1, 2, \dots, L$:

Середнє значення інтенсивності витрачання (списування) виду g визначається із співвідношення (за аналогією з невитратними засобами):

$$\lambda_{23}^{(g)} = \frac{1}{t_{\text{вик}}^g} = \frac{\sum_{r=1}^R c_{rg} \cdot m_{y_2}^{(r)}}{\sum_{r=1}^R (c_{rg} \cdot m_{y_2}^{(r)} \cdot \sum_{i=2}^6 t_{ri})} \quad (18)$$

де $t_{\text{вик}}^g$ – сумарний середній час використання протягом виїзду одиниці витрат коштів виду g.

Розглянувши докладно всі складові процесу $X(t)$ можливо скласти такі рівняння динаміки середніх значень із відповідними початковими умовами:

$$\left\{ \begin{aligned} \left(\frac{dm_{z_0}^{(l)}}{dt} \right) &= \lambda_{70}^{(l)} \cdot m_{z_7}^{(l)} - \lambda_{01}^l \cdot m_{z_0}^{(l)} \\ \left(\frac{dm_{z_1}^{(l)}}{dt} \right) &= \lambda_{01}^{(l)} \cdot m_{z_0}^{(l)} - \lambda_{12}^{(l)} \cdot m_{z_1}^{(l)} \\ \left(\frac{dm_{z_2}^{(l)}}{dt} \right) &= \lambda_{12}^{(l)} \cdot m_{z_1}^{(l)} - \lambda_{23}^{(l)} \cdot m_{z_2}^{(l)} \\ \left(\frac{dm_{z_3}^{(l)}}{dt} \right) &= \lambda_{23}^{(l)} \cdot m_{z_2}^{(l)} - \lambda_{34}^{(l)} \cdot m_{z_3}^{(l)} \\ \left(\frac{dm_{z_4}^{(l)}}{dt} \right) &= \lambda_{34}^{(l)} \cdot m_{z_3}^{(l)} - \lambda_{45}^{(l)} \cdot m_{z_4}^{(l)} \\ \left(\frac{dm_{z_5}^{(l)}}{dt} \right) &= \lambda_{45}^{(l)} \cdot m_{z_4}^{(l)} - \lambda_{56}^{(l)} \cdot m_{z_5}^{(l)} \\ \left(\frac{dm_{z_6}^{(l)}}{dt} \right) &= \lambda_{56}^{(l)} \cdot m_{z_5}^{(l)} - \lambda_{67}^{(l)} \cdot m_{z_6}^{(l)} \\ \left(\frac{dm_{z_7}^{(l)}}{dt} \right) &= \lambda_{67}^{(l)} \cdot m_{z_6}^{(l)} - \lambda_{70}^{(l)} \cdot m_{z_7}^{(l)} \end{aligned} \right. \quad (20)$$

$$\sum_{i=0}^7 m_{z_i}^{(l)} = N_l^{(l)}$$

$$m_{z_0}^{(l)} = N_l^{(l)}, m_{z_1}^{(l)}(0) = m_{z_2}^{(l)}(0) = \dots = m_{z_7}^{(l)}(0) = 0, l = 1, 2, \dots, L.$$

Для невитратних технічних засобів (процесу $W_j(t)$, $j = 1, 2, \dots, J$):

$$\left\{ \begin{aligned} \left(\frac{dm_{w_0}^{(j)}}{dt} \right) &= -(\lambda_{01}^{(j)} + \lambda_{02}^{(j)}) \cdot m_{w_0}^{(j)} + \lambda_{10}^{(j)} \cdot m_{w_1}^{(j)} + \lambda_{40}^{(j)} \cdot m_{w_4}^{(j)} \\ \left(\frac{dm_{w_1}^{(j)}}{dt} \right) &= \lambda_{01}^{(j)} \cdot m_{w_0}^{(j)} - \lambda_{10}^{(j)} \cdot m_{w_1}^{(j)} \\ \left(\frac{dm_{w_2}^{(j)}}{dt} \right) &= \lambda_{12}^{(j)} \cdot m_{w_1}^{(j)} - \lambda_{23}^{(j)} \cdot m_{w_1}^{(j)} \\ \left(\frac{dm_{w_3}^{(j)}}{dt} \right) &= \lambda_{23}^{(j)} \cdot m_{w_2}^{(j)} - \lambda_{34}^{(j)} \cdot m_{w_1}^{(j)} \\ \left(\frac{dm_{w_4}^{(j)}}{dt} \right) &= \lambda_{34}^{(j)} \cdot m_{w_3}^{(j)} - \lambda_{40}^{(j)} \cdot m_{w_1}^{(j)} \end{aligned} \right. \quad (21)$$

$$\sum_{i=0}^4 m_{w_i}^{(j)} = N_j^{(j)}$$

$$m_{w_0}^{(j)} = N_j^{(j)}, m_{w_1}^{(j)}(0) = m_{w_2}^{(j)}(0) = \dots = m_{w_4}^{(j)}(0) = 0, j = 1, 2, \dots, J$$

Для засобів, що витрачаються (процес $V_l^{(g)}$, $g = 1, 2, \dots, G$):

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{dm_{v_0}^{(g)}}{dt} \right) = \varepsilon_g - \lambda_{01}^{(g)} \cdot m_{v_0}^{(g)} \\ \left(\frac{dm_{v_1}^{(g)}}{dt} \right) = \lambda_{01}^{(g)} \cdot m_{v_0}^{(g)} - \lambda_{12}^{(g)} \cdot m_{v_1}^{(g)} \\ \left(\frac{dm_{v_2}^{(g)}}{dt} \right) = \lambda_{12}^{(g)} \cdot m_{v_1}^{(g)} - \lambda_{23}^{(g)} \cdot m_{v_2}^{(g)} \\ \left(\frac{dm_{v_3}^{(g)}}{dt} \right) = \lambda_{23}^{(g)} \cdot m_{v_2}^{(g)} \end{array} \right. \quad (22)$$

$$\sum_{i=0}^3 m_{v_i}^{(g)}(T) = N_g^{(g)}(0) + \int_0^T \varepsilon_g(t) dt,$$

$$m_{v_0}^{(g)}(0) = N_g^{(g)}, m_{v_1}^{(g)}(0) = m_{v_2}^{(g)}(0) = m_{v_3}^{(g)}(0) = 0, g = 1, 2, \dots, G.$$

Системи диференціальних рівнянь (19), (20), (21) та (22), які описують динаміку середніх значень станів, записуються для однорідних елементів конкретного виду, кількість яких у системі є достатньою для коректного статистичного узагальнення (що відповідає більшості видів ресурсів у гарнізонах середніх і великих міст). Співвідношення (11), (12), (14), (15), (17) та (18) нормують і визначають початкові умови інтегрування зазначених систем диференціальних рівнянь, а також загальну кількість елементів кожного виду ресурсів, що є у гарнізоні ДСНС. Чисельне інтегрування цієї системи диференціальних рівнянь дозволяє отримати динаміку станів усіх елементів системи обслуговування, що в подальшому дає можливість оцінити основні критерії ефективності функціонування гарнізону, такі як оперативність реагування, надійність виконання завдань, раціональність використання ресурсів та стійкість процесів обслуговування.

У випадку, коли в аналізованій системі є лише невелика кількість однорідних одиниць (менше 8, як показують дослідження застосування методу динаміки середніх значень), квазідетермінований підхід (метод динаміки середніх значень), використаний

при побудові системи рівнянь, може спричиняти певні похибки. Це означає, що застосований метод у таких умовах може давати істотну похибку.

Використання системно-кібернетичного підходу дозволяє визначити роль та місце ефективності в управлінні складними системами, до яких також відноситься гарнізон ДСНС. Управління неможливе без попереднього формування цільової функції, яку можна розбити на набір окремих цілей, кожній із яких відповідають контрольні параметри досягнення результату.

Основною метою діяльності гарнізону ДСНС є координація роботи різних підрозділів. Ця мета складається з низки конкретних завдань, для виконання яких програмне забезпечення виконує відповідні функції, результатами яких є певні показники ефективності.

Тому при формуванні цільової функції варто уважно поставитися до окремих функцій та завдань, які вона моделює, виділити з них значущі. А щоб оцінити ефективність функціонування системи, що моделюється, дослідник співвідносить показники контрольних параметрів отриманого результату із заданими (рис. 6).



Рисунок – 6 Системно-кібернетичний підхід до управління ресурсами гарнізону ДСНС

Дана модель дозволяє отримати основні аналітичні закономірності між показниками оперативної діяльності гарнізону ДСНС (часові характеристики прибуття до місця виклику, проведення розвідки місця пожежі, проведення АРР та ін. видів службової діяльності), кількістю ресурсів гарнізону ДСНС, показники оперативної обстановки (динаміки зміни кількості пожеж, загорянь, хибних виїздів, виїзди на інші заходи), а також показниками ефективності функціонування гарнізону ДСНС.

Запропонуємо методику оцінки ефективності управління ресурсами гарнізону ДСНС, що основана на розрахунку значень коефіцієнтів оперативної готовності сил та засобів

гарнізону ДСНС, що буде складатися з 3-х етапів:

1 етап, на якому відбувається формування вихідних даних:

– прогнозування пожежної обстановки на території гарнізону ДСНС (формування вектору);

$$\lambda_{\text{пр}} = \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_R \quad (23)$$

– аналіз оперативної діяльності гарнізону ДСНС (розрахунок значень елементів матриць a, b, c, T);

– формування можливих альтернативних рішень щодо кількісного оснащення ресурсами гарнізону ДСНС:

$$N^{(l)} = (N_1^{(l)}, N_2^{(l)}, \dots, N_L^{(l)}), N^{(j)} = (N_1^{(j)}, N_2^{(j)}, \dots, N_J^{(j)}), N^{(g)} = (N_1^{(g)}, N_2^{(g)}, \dots, N_G^{(g)}) \quad (24)$$

2 етап, на якому розраховується динаміка чисельності станів елементів ресурсів гарнізону ДСНС:

– формування графів переходів системи та матриць інтенсивності переходів з урахуванням усіх параметрів оперативної діяльності, оперативної обстановки та кількісних показників ресурсів гарнізону ДСНС;

– формування початкових умов та систем диференціальних рівнянь у відповідно до формованого кількісного складу ресурсів гарнізону ДСНС;

– інтегрування систем диференціальних рівнянь за початкових умов.

3 етап, на якому розраховуються значення коефіцієнтів оперативної готовності особового складу

Коефіцієнти оперативної готовності особового складу виду "l" (командири

відділень, водії, пожежні та ін.) для кожного моменту часу "t" розраховуються за наступним співвідношенням:

$$K_{\text{ос},l}(t) = \frac{m_{z_0}^{(l)}(t) + m_{z_7}^{(l)}(t)}{N_L^{(l)}}, \quad (25)$$

де $m_{z_0}^{(l)}(t)$ - середня кількість особового складу виду l , що знаходиться на чергуванні;

$m_{z_7}^{(l)}(t)$ - середня кількість особового складу виду "l", що перебуває у стані збору та повернення до місця постійної дислокації з місця ліквідації пожежі або НС;

$N_L^{(l)}$ - загальна кількість особового складу виду l .

Коефіцієнт оперативної готовності невитратних матеріальних ресурсів (засобів) виду "j" (автоцистерни, автодрабини, автомобілі газодимозахисної

служби та ін.) для кожного моменту часу "t" визначається співвідношенням:

$$K_{p,j}(t) = \frac{m_{w_0}^{(j)}(t) + m_{w_4}^{(j)}(t)}{N_j^{(j)}}, \quad (26)$$

де $m_{w_0}^{(j)}(t)$ - середня кількість ресурсів та засобів виду j, що перебувають у гарнізоні ДСНС;

$m_{w_4}^{(j)}(t)$ - середня кількість невитратних матеріальних ресурсів, що перебувають у стані збору та повернення до місця постійної дислокації з місця ліквідації пожежі чи НС;

$N_j^{(j)}$ - загальна кількість невитратних матеріальних ресурсів виду j, що знаходиться у розпорядженні гарнізону ДСНС.

Враховуючи, що керівний склад, як правило, можуть цікавити значення коефіцієнтів оперативної готовності особового складу виду $l\bar{K}_{oc,l}(T)$ та невитратних матеріальних ресурсів (коштів) виду $j\bar{K}_{p,j}(T)$ за певний період часу T, то дані коефіцієнти можна визначити наступним чином:

$$\bar{K}_{oc,l} = \frac{1}{T} \int_0^T K_{oc,l}(t) dt, \bar{K}_{p,j}(T) = \frac{1}{T} \int_0^T K_{p,j}(t) dt \quad (27)$$

де T - розрахунковий період функціонування гарнізону.

У випадку, якщо вихідні дані в моделі, а, отже, і функції коефіцієнтів оперативної готовності мають вигляд частково-постійних функцій, то вирази набудуть наступного вигляду:

$$\bar{K}_{oc,l}(T) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T K_{oc,l}(t), \bar{K}_{p,j}(T) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T K_{p,j}(t) \quad (28)$$

Комплексні коефіцієнти оперативної готовності особового складу (сил) $K_{oc}(t)$ і невитратних матеріальних ресурсів $K_p(t)$ пропонується визначати як середньозважені суми коефіцієнтів оперативної готовності кожного виду, що входить до складу ресурсів гарнізону на кожен момент часу t:

$$K_{oc}(t) = \sum_{l=1}^L K_{oc,l}(t) \cdot \frac{N_l^{(l)}}{N_L}, K_p(t) = \sum_{j=1}^J K_{p,j}(t) \cdot \frac{N_j^{(j)}}{N_J}, \quad (29)$$

де $N_L = \sum_{l=1}^L N_l^{(l)}, N_J = \sum_{j=1}^J N_j^{(j)}$ - загальна чисельність особового складу (сил) та невитратних матеріальних ресурсів (засобів) гарнізону ДСНС.

На основі динаміки зміни значень комплексних коефіцієнтів оперативної готовності сил та засобів можна розрахувати їхнє середнє значення за визначений період часу T:

$$\bar{K}_{oc}(T) = \frac{\int_0^T K_{oc}(t) dt}{T}, \bar{K}_p(T) = \frac{\int_0^T K_p(t) dt}{T}, \quad (30)$$

для частково-постійних функцій:

$$\bar{K}_{oc}(T) = \frac{\int_0^T K_{oc}(t) dt}{T}, \bar{K}_p(T) = \frac{\int_0^T K_p(t) dt}{T}. \quad (31)$$

Висновки та напрями подальших досліджень. У результаті проведеного дослідження досягнуто поставленої мети та виконано наступні завдання, що дало змогу отримати такі основні наукові та прикладні результати:

1. Сформовано комплексну стохастичну модель процесу управління ресурсами гарнізону ДСНС. Модель описує взаємозв'язок між подіями, особовим складом, технічними засобами та витратними ресурсами у часі та побудована у вигляді векторного випадкового процесу $X(t)$ із залежними компонентами. Такий підхід забезпечує формалізований опис динаміки ресурсів в умовах транзитивної взаємодії.

2. Виведено системи диференціальних рівнянь, які описують динаміку середніх значень станів усіх видів ресурсів гарнізону ДСНС. Ці системи отримані на основі квазідетермінованого підходу (методу динаміки середніх значень), що є ефективним та обґрунтованим за умови достатньої кількості однорідних елементів у системі.

3. Розроблено методику оцінки ефективності управління ресурсами, що базується на розрахунку коефіцієнтів оперативної готовності сил і засобів. Запропоновано трьохетапний алгоритм їх практичного визначення, який зв'язує чисельне інтегрування систем

диференціальних рівнянь із кількісною оцінкою ефективності.

4. Сформовано співвідношення початкових умов, які визначають загальну кількість елементів кожного виду ресурсу, що є необхідним елементом для практичного чисельного інтегрування виведених систем диференціальних рівнянь.

Таким чином, розроблена комплексна математична модель та методика оцінки ефективності управління ресурсами створюють науково-методичне підґрунтя для підвищення обґрунтованості управлінських рішень, оптимізації розподілу матеріально-технічних і фінансових ресурсів та зростання рівня оперативної готовності пожежно-рятувальних підрозділів.

Важливим етапом подальших досліджень та практичної реалізації

отриманих результатів є автоматизація розрахунків за запропонованою моделлю та методикою оцінки ефективності управління ресурсами гарнізону ДСНС.

Ключовим кроком на цьому шляху є розробка системи підтримки прийняття рішень, яка безпосередньо відповідає за управління ресурсами гарнізону ДСНС. Така система дозволить автоматизувати процеси аналізу, розрахунку та оптимізації використання ресурсів у реальному часі, забезпечуючи своєчасне реагування на надзвичайні ситуації, зменшення впливу людського фактору і підвищення загальної ефективності роботи.

У результаті, інтеграція цієї системи у щоденну діяльність гарнізону сприятиме більш ефективному плануванню та розподілу ресурсів, що є критично важливим для підвищення рівня безпеки та оперативності дій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Zhang G., Liu X., Peng Y. A Simulation Optimization Method for Scheduling Automated Guided Vehicles in a Stochastic Warehouse Management System. 2023 *Winter Simulation Conference (WSC)*. 2023. P. 3238–3249. URL: <https://doi.org/10.1109/WSC60868.2023.10407793>.
2. Ingolfsson A., Erkut E., Budge S. Simulation of single start station for Edmonton EMS. *Journal of the Operational Research Society*. 2003. Vol. 54, no. 7. P. 736–746. URL: <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601574>.
3. Fundamentals of queueing theory. J. F. Shortle, J. M. Thompson, D. Gross, C. M. Harris. 5th ed. Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, 2018. 541 p. URL: <https://www.scribd.com/document/896766557/Fundamentals-of-Queueing-Theory-5th-Edition-PDF>.
4. Minas J., Simpson N., Tacheva Z. Modeling emergency response operations: A theory building survey. *Computers & Operations Research*. 2020. Vol. 119. P. 104921. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.104921>.
5. Новожилова М. В., Михайловська Ю. В. Розробка організаційно-технічного метод формування ресурсного забезпечення реагування на надзвичайні ситуації. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.4400160>.
6. Климась Р. В., Одинець А. В., Матвійчук Д. Я., Несенюк Л. П. Результати аналізу основних показників статистики пожеж в Україні по відношенню до часу прибуття першого підрозділу пожежної охорони. URL: <https://doi.org/10.52363/nvz.2019.1.76-84>.
7. Кустов М. В., Федоряка О. І., Корнієнко Р. В. Ефективність методу територіального розміщення пожежних підрозділів різної функціональної спроможності. URL: <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2022-36-5>.
8. Runefors M. Measuring the Capabilities of the Swedish Fire Service to Save Lives in Residential Fires. *Fire Technology*. 2020. Vol. 56, no. 2. P. 583–603. URL: <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00892-y>.
9. Matinrad N. An Operations Research Approach for Daily Emergency Management. 2019. URL: <https://doi.org/10.3384/lic.diva-157099>.
10. Рубан І., Тютюнник В., Тютюнник О. Особливості створення системи підтримки прийняття антикризових рішень в умовах невизначеності вхідної інформації при надзвичайних ситуаціях. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2021. Т. 40, № 1. С. 75–84. URL: <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2021-40-1-75-84>.
11. Шабельник Т. В. Математичне моделювання соціально-економічних систем. Маріуполь : МДУ, 2019. 135 с. URL: <http://www.repository.hneu.edu.ua/handle/123456789/28090>.

REFERENCES

1. Zhang, G., Liu, X., & Peng, Y. (2023). A Simulation Optimization Method for Scheduling Automated Guided Vehicles in a Stochastic Warehouse Management System. In *2023 Winter Simulation Conference*, 3238–3249. <https://doi.org/10.1109/WSC60868.2023.10407793>.
2. Ingolfsson, A., Erkut, E., & Budge, S. (2003). Simulation of single start station for Edmonton EMS. *Journal of the Operational Research Society*, 54(7), 736–746. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601574>.
3. Gross, D., Shortle, J. F., Thompson, J. M., & Harris, C. M. (2018). *Fundamentals of queueing theory* (5th ed.). John Wiley & Sons. <https://www.scribd.com/document/896766557/Fundamentals-of-Queueing-Theory-5th-Edition-PDF>.

4. Minas, J., Simpson, N., & Tacheva, Z. (2020). Modeling emergency response operations: A theory building survey. *Computers & Operations Research*, 119, 104921. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.104921>.
5. Novozhylova M. V., Mykhailovska Yu. V. (2020). Rozrobka orhanizatsiino-tekhnichnoho metod formuvannia resursnoho zabezpechennia reahuvannia na nadzvychni situatsii. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4400160>.
6. Klymas, R., Odynets, A., Matviichuk, D., & Nesenjuk, L. (2019). Rezultaty analizu osnovnykh pokaznykh statystyky pozhezh v ukraini po vidnoshenni do chasu prybuttia pershoho pidrozdilu pozhezhnoi okhorony. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, 1(1(7)), 76–84. <https://doi.org/10.52363/nvcz.2019.1.76-84>.
7. Kustov, M. V., Fedoriaka, O. I., & Korniienko, R. V. (2022). Efektyvnist metodu terytorialnoho rozmishchennia pozhezhnykh pidrozdiliv riznoi funktsionalnoi spromozhnosti. *Problems of Emergency Situations*, 2(36), 54–65. <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2022-36-5>.
8. Runefors, M. (2020). Measuring the Capabilities of the Swedish Fire Service to Save Lives in Residential Fires. *Fire Technology*, 56(2), 583–603. <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00892-y>.
9. Matinrad, N. (2019). *An Operations Research Approach for Daily Emergency Management*. <https://doi.org/10.3384/lic.diva-157099>.
10. Ruban, I., Tiutiunyk, V., & Tiutiunyk, O. (2021). Osoblyvosti stvorennia systemy pidtrymky pryiniattia antykrizovykh rishen v umovakh nevyznachenosti vkhidnoi informatsii pry nadzvychnykh situatsiiakh. *Suchasni informatsiini tekhnologii u sferi bezpeky ta oborony*, 40(1), 75–84. <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2021-40-1-75-84>.
11. Shabelnyk, T. V. (2019). Matematychnye modeliuvannia sotsialno-ekonomichnykh system. MDU. <http://www.repository.hneu.edu.ua/handle/123456789/28090>.

DEVELOPMENT OF A MODEL FOR DESCRIBING AND EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF DECISION-MAKING AND RESOURCE MANAGEMENT IN THE STATE EMERGENCY SERVICE GARRISON

S. Shevchenko¹, V. Lutsyk¹, O. Kovalev², Y. Gaponenko¹, M. Zmaha¹

¹National University of Civil Defence of Ukraine, Ukraine

²Main Department of the State Emergency Service of Ukraine in Kharkiv Region, Kharkiv, Ukraine

KEYWORDS:

efficiency, fire and rescue units, garrison, modeling, operational readiness, resource management, State Emergency Service, stochastic model.

ABSTRACT

The article solves an urgent scientific and applied problem regarding increasing the efficiency of resource management of fire and rescue units of the garrison of the State Emergency Service of Ukraine. The relevance of the study is due to the need to optimize the distribution of forces and means in conditions of high intensity of calls and limited resource provision. The object of the study is the processes of functioning of the garrison as a complex dynamic system subject to the influence of random factors. A system-cybernetic approach is applied in the work, within which the state of the system is determined by the dynamic interaction of four key groups of resources: incoming events, personnel, technical means and material means. The scientific novelty of the study lies in the development of a complex stochastic mathematical model, where the functioning of units is represented as a vector random process with dependent components. A formalized description of the behavior of resource units through transition graphs between probabilistic states is proposed. Unlike existing approaches, the model defines the intensity functions of transition flows, which dynamically depend on the average values of the states of other resource groups, which allows taking into account the effect of transitive interaction in the system. The application of the quasi-deterministic approach (the method of dynamics of average values) allowed moving from a stochastic description to systems of differential equations describing the evolution of resource indicators in time. The practical significance of the obtained results lies in the development of an algorithm for calculating operational readiness coefficients, which act as integrated indicators of management efficiency. Ratios of initial conditions for numerical integration of the derived systems of equations are formed, which makes it possible to predict the level of garrison readiness under various load scenarios. The modeling results create a scientific and methodological basis for making informed management decisions regarding the rational use of forces and means, ensuring the stability of unit functioning during peak periods.

УДК 614.841.345:006.83:519.2

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ТЕХНІЧНЕ РЕГУЛЮВАННЯ ПОЖЕЖНИХ КРАН-КОМПЛЕКТІВ

DOI: 10.52363/2518-1777-2026-21-12

Коваль Р. Р.¹, ORCID iD 0000-0001-8970-2831

Коваль Н.О.¹, ORCID iD 0000-0003-0988-3500

Середа Д.В.¹, ORCID iD 0000-0002-9645-5864

Несенюк Л.П.¹, ORCID iD 0000-0002-7796-7952

Ємельяненко С.О.², ORCID iD 0000-0002-2766-8428

Коваль І.Р.², ORCID iD 0009-0006-3908-7790

*E-mail: koval_roman@nuczu.edu.ua

¹Інститут наукових досліджень з цивільного захисту НУЦЗ України, Україна

²Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ	АНОТАЦІЯ
Надійшла до редакції: 12.04.2026	У статті представлено результати оцінки ефективності пожежних кран-комплектів основі аналізу масивів статистичних даних про пожежі в Україні та обґрунтування напрямів їх технічного регулювання. Методологічну основу дослідження становлять статистичний аналіз застосування пожежних кран-комплектів, системний аналіз нормативної бази, використання ризик-орієнтованого підходу. Встановлено, що фактична ефективність використання ПКК як первинних засобів пожежогасіння є вкрай низькою, що свідчить про невідповідність їх технічних характеристик та експлуатаційних властивостей реальним умовам використання. На основі аналізу статистичних даних і факторів, що впливають на ефективність застосування ПКК (ергономічні обмеження, нестабільність гідравлічних параметрів, технічний стан та конструктивні особливості), визначено ключові проблеми функціонування систем внутрішнього протипожежного водопостачання. Систематизовано технічні вимоги та методи випробувань пожежних кран-комплектів відповідно до європейських стандартів серії EN та визначено їх роль. Обґрунтовано напрями вдосконалення технічного регулювання, зокрема щодо параметрів витрати та тиску, ергономічних характеристик, надійності елементів, а також забезпечення сумісності з'єднувальних елементів у контексті гармонізації з європейською практикою (перехід від системи «Богданова» до «Storz» або застосування адаптерів). Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення національної нормативної бази, підвищення ефективності внутрішнього протипожежного водопостачання та усунення технічних бар'єрів у сфері обігу пожежно-технічної продукції.
Прийнято: 05.05.2026	
Опубліковано: 30.05.2026	
КЛЮЧОВІ СЛОВА:	
пожежні кран-комплекти, статистичний аналіз пожеж, технічне регулювання, гідравлічні параметри, ергономічність, ризик-орієнтований підхід.	

Постановка

Забезпечення пожежної безпеки є важливою складовою функціонування будівель та споруд, що вимагає впровадження комплексних систем протипожежного захисту. Ці системи включають пасивні заходи, спрямовані на обмеження поширення вогню (наприклад, вогнестійкі конструкції) і активні заходи,

проблеми.

що передбачають безпосереднє гасіння пожежі.

До активних засобів відносяться первинні засоби пожежогасіння, які призначені для локалізації та ліквідації пожеж на початковій стадії їх виникнення, що важливо для запобігання поширенню вогню та мінімізації збитків до прибуття пожежно-рятувальних підрозділів.

Пожежні кран-комплекти (далі – ПКК), є однією з найефективніших та найменш витратних у обслуговуванні систем ліквідації пожежі, особливо на промислових об'єктах.

Стаття зосереджується на оцінці ефективності, технічних вимогах та методах випробування ПКК.

ПКК належать до первинних засобів пожежогасіння, оскільки вони є доступними та можуть бути використані для оперативного гасіння пожежі на початковій стадії її розвитку, до прибуття рятувальників. Можливість швидкого реагування має важливе значення для мінімізації потенційних збитків та збереження людських життів. Простота використання ПКК дозволяє застосовувати їх будь-якою особою, яка перебуває на об'єкті, що підвищує ефективність їх застосування під час гасіння пожежі. Обов'язкова наявність ПКК у всіх житлових, промислових, складських, офісних та торгово-розважальних будівлях та спорудах підкреслює їхню роль у загальній системі пожежної безпеки та відповідність нормативним вимогам [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання нормативного забезпечення, проектування та експлуатації стаціонарних систем пожежогасіння, зокрема систем внутрішнього протипожежного водопостачання перебуває у центрі уваги вітчизняних і зарубіжних науковців.

У наукових працях розглядаються підходи до формування технічних вимог, методів випробувань і складу випробувального обладнання для пожежно-технічного оснащення, включаючи ПКК та їх складові. Окрему увагу в дослідженнях приділено аналізу гідродинамічних характеристик елементів систем внутрішнього протипожежного водопроводу, а також обґрунтуванню вибору діаметрів ПКК з урахуванням умов їх експлуатації. У цьому контексті важливими є роботи Петухової О.А., Горносталь С.А. та Щербак С.М. у яких підкреслюється необхідність забезпечення відповідності технічних рішень чинним

нормативним вимогам, а також обґрунтовується вибір конструктивних параметрів для різних типів об'єктів [2-4].

Окремий напрям досліджень пов'язаний із гармонізацією національних стандартів щодо ПКК із європейськими нормами серії EN. Науковці ІНДЦЗ НУЦЗ України приділяють увагу адаптації сучасних підходів до нормування технічних характеристик таких елементів, як пожежні рукави, стволи, вентиля, з'єднувальні головки та шафи, а також розробленню методів їх комплексних випробувань у складі єдиної системи.

Зарубіжна практика, зокрема в межах діяльності технічного комітету CEN/TC 191, орієнтована на забезпечення функціональної надійності ПКК через чітке регламентування їх комплектності, взаємної сумісності елементів і експлуатаційних характеристик. Значна увага приділяється ергономіці застосування, зокрема зменшенню зусиль при розгортанні пожежного рукава, оптимізації способів його укладання в шафі (зигзагоподібно або на катушці), скороченню часу приведення в дію, а також забезпеченню стабільних гідравлічних параметрів під час подачі води.

Разом із тим, аналіз вітчизняної нормативної бази свідчить, що вимоги до ПКК залишаються недостатньо систематизованими: окремі їх складові нормуються різними стандартами без урахування їх функціональної взаємодії у складі єдиної системи. Відсутність комплексного підходу до встановлення технічних вимог і методів випробувань у цілому знижує ефективність їх застосування за призначенням. Це зумовлює необхідність розроблення узгодженого нормативного підходу, гармонізованого з європейськими вимогами, що дозволить підвищити надійність зазначених систем і усунути технічні бар'єри у сфері обігу відповідної продукції.

Проблематика гармонізації національних стандартів із європейськими нормами (серії EN) та розроблення сучасних методів випробувань також є

предметом досліджень науковців ІНДЦЗ України, де значну увагу приділено адаптації міжнародних підходів до умов національної системи технічного регулювання [5, 6].

CEN/TC 191 також акцентує увагу на чіткому нормуванні технічних характеристик елементів ПКК, їх комплектності та ергономіці застосування.

Водночас вітчизняне нормативне забезпечення у сфері регламентування вимог до ПКК тривалий час залишалося фрагментарним і потребує комплексної актуалізації з метою усунення технічних бар'єрів у торгівлі та забезпечення інтеграції до європейської системи технічного регулювання.

Методи дослідження. У дослідженні застосовано комплексний методологічний підхід, що ґрунтується на поєднанні теоретичних, статистичних та аналітичних методів наукового дослідження для оцінювання ефективності ПКК, аналізу чинних технічних вимог та обґрунтування напрямів удосконалення технічного регулювання.

Зокрема, використано методи статистичного аналізу, які застосовувалися для обробки та узагальнення масивів статистичних даних щодо кількості пожеж і випадків використання ПКК як первинних засобів пожежогасіння протягом 2021–2025 років.

Метод системного аналізу використано для комплексного дослідження функціонування ПКК, встановлення взаємозв'язків між їх складовими елементами (рукавами пожежними, вентилями, перекивними стволами, з'єднувальною арматурою) та оцінювання ефективності чинних нормативно-технічних вимог.

Ризик-орієнтований підхід застосовано для визначення факторів, що впливають на ефективність функціонування ПКК, включаючи гідравлічні, технічні та ергономічні аспекти експлуатації. Використання цього підходу дозволило оцінити потенційний вплив окремих відмов або недоліків конструктивних елементів на

результативність застосування ПКК під час гасіння пожеж на початковій стадії.

Методи порівняльного аналізу та систематизації застосовано під час дослідження міжнародних технічних вимог і методів випробувань ПКК, що дало змогу визначити перспективні напрями гармонізації технічного регулювання, зокрема щодо використання сучасних типів з'єднувальної арматури.

Застосування зазначених методів забезпечило можливість комплексної оцінки сучасного стану використання ПКК, виявлення чинників, що обмежують ефективність їх застосування, а також науково обґрунтувати напрями підвищення рівня використання шляхом удосконалення технічних вимог, методів випробувань і нормативного забезпечення.

Формулювання цілей дослідження. Метою дослідження є оцінка ефективності застосування ПКК на основі аналізу масивів статистичних даних та обґрунтування напрямів їх технічного регулювання.

Для досягнення поставленої мети передбачено вирішення таких завдань: проведення аналізу чинного нормативного забезпечення у сфері регламентування вимог до ПКК та їх складових, оцінювання ефективності застосування ПКК на основі статистичних даних про пожежі, визначення ключових факторів, що впливають на їх функціональну ефективність (гідравлічні параметри, ергономічні характеристики, технічний стан і конструктивні особливості), систематизація технічних параметрів основних елементів ПКК, узагальнення методів випробувань як інструменту підтвердження працездатності та надійності систем, аналіз європейських нормативних документів і формування пропозицій щодо гармонізації національного технічного регулювання, зокрема в частині підвищення експлуатаційної ефективності ПКК.

Виклад основного матеріалу. ПКК – це спеціалізований комплект обладнання, що є частиною внутрішнього протипожежного водопостачання будівлі

або споруди. Його основне призначення полягає у забезпеченні швидкої та ефективної подачі вогнегасної речовини, як правило, води, з пожежних трубопроводів безпосередньо до місця загоряння.

Технічні вимоги, обслуговування, методи контролю та випробування ПКК в Україні регламентуються національними стандартами [7-12]. Ці стандарти прийняті методом підтвердження та потребують технічного перекладу і впровадження.



Рисунок 1 – ПКК з плоскоскладаним та напівжорстким рукавами

Класифікація за типом вентиля: вид ПКК, згідно з [7] також визначається типом використовуваного вентиля (крана). Це впливає на механізм активації системи подачі води:

– автоматичний ПКК – до катушки приєднується автоматичний вхідний запірний вентиль. Це забезпечує автоматичну подачу води при активації системи, що може бути перевагою у випадках, коли людський фактор обмежений або потрібна максимально швидка реакція

– ручний ПКК – до катушки приєднується ручний вхідний запірний

Класифікація ПКК здійснюється за кількома основними критеріями, серед яких основним є тип використовуваного рукава та механізм активації вентиля.

Щодо класифікації за типом рукава, кожен з яких має свої конструктивні особливості та експлуатаційні переваги:

- плоскоскладаний пожежний рукав;
- напівжорсткий пожежний рукав

(Рис. 1).

вентиль. Цей тип вимагає ручного відкриття для подачі води, що надає користувачу повний контроль над процесом [7-9].

На основі аналізу масивів статистичних даних встановлено, що ПКК як первинні засоби пожежогасіння характеризуються низьким рівнем використання.

Так у період 2021-2025 років ПКК у якості первинних засобів пожежогасіння використовувалися 208 раз.

Статистику цих показників наведено в таблиці 1 [13].

Таблиця 1 Загальна динаміка використання ПКК

Назва показника	Рік					Всього
	2021	2022	2023	2024	2025	
Кількість пожеж на яких в якості первинних засобів пожежогасіння використовується ПКК	43	50	39	45	31	208

Встановлено, що ПКК у період з 2021 по 2025 роки використовувалися 208 раз з 283509 пожеж на об'єктах де вони передбачені у зв'язку з тим, що ПКК формально виконують свою функцію та не придатні для їх ефективного застосування [13]. Основною причиною такого стану є

недостатнє нормативне врегулювання технічних вимог щодо ПКК.

Результати аналізу свідчать про наявність системних проблем, пов'язаних із невідповідністю окремих елементів ПКК сучасним експлуатаційним вимогам.

Зокрема, є випадки втрати герметичності з'єднань, зниження гнучкості та міцності пожежних рукавів у процесі старіння, а також конструктивна невідповідність перекирваних пожежних стволів умовам швидкого введення в дію. Ускладнює ситуацію відсутність уніфікованих підходів до методів випробувань і критеріїв оцінки працездатності ПКК у складі стаціонарних систем пожежогасіння. Це призводить до формального характеру їх перевірок і не гарантує належного рівня готовності до застосування за призначенням, що обґрунтовує необхідність удосконалення нормативної бази на засадах гармонізації з міжнародними стандартами та впровадження ризик-орієнтованих підходів до оцінювання їх ефективності.

Проведено дослідження загальної статистики використання ПКК та встановлено наступне.

Протягом 2021-2025 років, кількість пожеж, на яких ПКК використовувались як первинні засоби пожежогасіння, демонструє підвищення, з піком у 2022 році – 50 випадків і подальшим зниженням до 31 випадку у 2025 році [13].

Ця тенденція до зниження наприкінці періоду може свідчити про кілька взаємопов'язаних чинників:

1. Можливе підвищення ефективності використання інших первинних засобів пожежогасіння, таких як вогнегасники, що дозволяє локалізувати пожежу до необхідності залучення ПКК.

2. Скорочення часу прибуття пожежних підрозділів може зменшувати потребу у використанні ПКК як первинних засобів цивільним населенням або персоналом, оскільки професійні бригади одразу застосовують свої засоби та джерела водопостачання.

3. Зниження рівня працездатності або доступності самих ПКК на об'єктах з плином часу, що обмежує їх ефективне застосування.

З метою проведення більш детального аналізу кількість пожеж на яких використовувались ПКК у якості первинних засобів пожежогасіння було здійснено розподіл кількості цих пожеж в залежності від типу об'єкту (Табл. 2).

Таблиця 2 – Розподіл кількості пожеж при гасінні яких використовувались ПКК за типами об'єктів

Назва показника		Рік				
		2021	2022	2023	2024	2025
Кількість пожеж на яких в якості первинних засобів пожежогасіння використовувались ПКК	Житлові будинки	20	20	15	15	12
	Об'єкти на яких здійснюється державний нагляд (контроль)	23	30	24	30	19

Аналіз розподілу показників за типами об'єктів – житлові будинки та об'єкти, на яких здійснюється державний нагляд і контроль – виявляє суттєві відмінності та тенденції.

А саме, у житлових будинках кількість пожеж, де ПКК використовувались як первинні засоби, коливалася в діапазоні 12-20 випадків на

рік, демонструючи загальну тенденцію до зниження (з 20 у 2021 до 12 у 2025). Зменшення використання ПКК мешканцями як первинних засобів може бути зумовлене кількома причинами:

– недостатня обізнаність та відсутність навичок: мешканці житлових будинків, як правило, не мають спеціальної підготовки з використання ПКК. В умовах

стресу та паніки, а також через потенційні труднощі з доступом до ПКК (наприклад, замкнені шафи, відсутність ключів, захащеність шляхів доступу), їх використання може бути неможливим.

– технічний стан та обслуговування у житловому секторі, особливо в старих будинках, ПКК можуть бути в занедбаному стані, не проходити регулярного технічного обслуговування, що призводить до їх несправності або зниження ефективності тиску води.

– масштаб пожежі – багато пожеж у житлових будинках швидко набирати поширюються, що унеможлиблює ефективне гасіння за допомогою ПКК та вимагає негайного втручання пожежно-рятувальних підрозділів.

Одночасно на об'єктах, де здійснюється державний нагляд і контроль показники дещо відрізняються. Кількість пожеж, де ПКК використовувались як первинні засоби, коливалася від 6 до 15 випадків, демонструючи спад у 2023-2024 роках (з 15 у 2022 до 6 у 2024).

Разом з тим, проведено аналітичне дослідження нормативних вимог встановлених у 6 європейських стандартах – систематизовано та гармонізовано 34 види випробувань.

Випробування ПКК умовно поділено на 4 основні групи: гідравлічні, фізико-хімічні, механічні (ергономічні) та корозійні.

Для проведення випробувань ПКК, їх складових елементів та пожежних рукавів застосовується комплекс спеціалізованого випробувального й вимірювального обладнання.

Оцінювання працездатності вентилів та запірної арматури здійснюється шляхом візуального огляду із використанням рулетки або лічильника обертів для визначення кількості обертів під час відкривання і закривання.

Для визначення крутного моменту приведення ствола в дію застосовується динамометричний ключ. Випробування стволів на стійкість до удару та перевірка міцності котушок виконуються на спеціалізованих випробувальних стендах.

Перевірка характеристик подавання води, зокрема формування розпиленого струменя, мінімальної витрати та ефективної дальності подавання, проводиться із використанням гідравлічних стендів з подачею води, витратомірів, мірних рулеток, нерухомих опор та вертикальних мішеней із розміткою.

Випробування на герметичність, стійкість до внутрішнього тиску, міцність рукавів, визначення втрат тиску та оцінювання деформацій при згинанні або стисканні, виконуються на гідравлічних випробувальних стендах, оснащених насосами та манометрами.

Для визначення зусилля розмотування рукава додатково застосовуються динамометри або силовимірювачі.

Оцінювання довговічності та стійкості матеріалів до впливу зовнішніх факторів здійснюється із використанням кліматичного та спеціального лабораторного обладнання.

Зокрема, для випробувань на корозійну стійкість металевих елементів використовують камери сольового туману, для перевірки термічного старіння – термокамери з контрольованою температурою, для оцінювання гнучкості за низьких температур – морозильні камери, а для визначення стійкості до ультрафіолетового випромінювання – камери з ксеноновою дугою.

Випробування на стирання виконуються за допомогою абразиметрів, на стійкість до гарячої поверхні – із використанням стрижня розжарення, а оцінювання озоностійкості гумових компонентів проводиться в озонових камерах.

Адгезійні властивості покриттів рукавів визначаються із застосуванням розривних машин (тензиметрів).

Забезпечення ефективності ПКК у будівлях різного призначення безпосередньо залежить від їх здатності функціонувати в умовах реальних пожежних навантажень, що включають змінні гідравлічні режими, термічні та

механічні впливи, старіння матеріалів та людський фактор.

Тому стандарти, зокрема [6-11] регламентують комплекс випробувань, кожне з яких має чітке науково-технічне обґрунтування та спрямоване на моделювання критичних сценаріїв експлуатації.

У межах гідравлічних випробувань ПКК ключовим параметром є визначення витрати води та *K-фактора*, що характеризує пропускну здатність системи при різних рівнях тиску:

$$Q = K \cdot \sqrt{10P}, \quad (1)$$

де, Q (*витрата води*) – об'єм води (або іншої вогнегасної речовини), який виходить із пожежного ствола за одиницю часу. Вимірюється у літрах за хвилину (л/хв).

K (*K-фактор*) – коефіцієнт продуктивності пожежного ствола (пропускна здатність). Це незмінна конструктивна характеристика конкретного виробу. Чим більший отвір ствола (наприклад, для рукавів 25 мм або 52 мм), тим вищий його *K-фактор* (наприклад, $K=42$ або $K=80$).

P (*робочий тиск*) – динамічний тиск води в системі безпосередньо перед входом у пожежний ствол. У цій формулі значення тиску підставляється у мегапаскалях (МПа). Стандартні випробувальні тиски – 0,2; 0,4 та 0,6 МПа.

10 – коригувальний множник для переведення одиниць вимірювання. Оскільки класичне значення *K-фактора* прив'язане до тиску в барах, а у формулу ми підставляємо мегапаскалі (1 МПа = 10 бар), множення на 10 вирівнює розмірності

Враховуючи нестабільність внутрішніх водопровідних мереж будівель, особливо при одночасному використанні декількох точок водорозбору, підтвердження цього коефіцієнта забезпечує гарантовану подачу необхідного об'єму води навіть за мінімального тиску.

Це створює науково обґрунтовану основу для гідравлічного розрахунку систем протипожежного водопостачання та вибору насосного обладнання. Важливим є випробування на розривний тиск, яке дозволяє оцінити запас міцності рукава. У реальних умовах пожежогасіння можливі гідроудари та короточасні пікові навантаження, спричинені різкими змінами режиму подачі води. Встановлення кратного запасу міцності (у 3-4 рази більше робочого тиску) запобігає аварійному руйнуванню рукава, що важливо для безпеки користувача [4, 6, 7].

Додатково досліджуються деформаційні характеристики рукавів під тиском. Ці параметри безпосередньо впливають на керованість рукава під час гасіння пожежі у вузьких просторах. Надмірні деформації можуть призвести до утворення петель, перекручувань або навіть розгерметизації з'єднань, що унеможливує ефективне застосування ПКК [5, 7].

Для напівжорстких рукавів має значення випробування на стійкість до перегину. Воно моделює ситуації прокладання рукава через дверні прорізи, кути приміщень та інші перешкоди. Забезпечення безперервності потоку води навіть при значних вигинах є необхідною умовою стабільного функціонування системи.

Група фізико-хімічних випробувань спрямована на оцінку довговічності матеріалів у процесі тривалої експлуатації. Прискорене термічне старіння дозволяє змодельовати багаторічну деградацію полімерів, що перебувають переважно у складеному стані. Це дає змогу виявити потенційні втрати еластичності, появу тріщин та зниження міцності ще на етапі сертифікації [8, 11].

Випробування адгезії шарів рукава ПКК визначає надійність з'єднання внутрішнього гідроізоляційного шару з каркасом (Рис. 2).

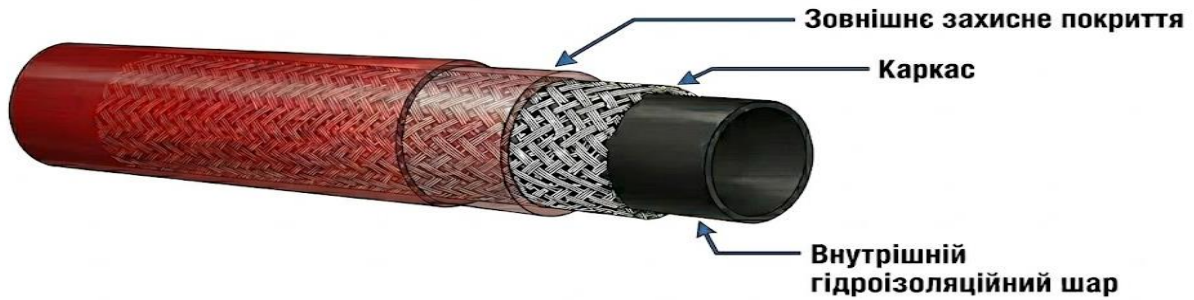


Рисунок 2 – Схема пожежного рукава ПКК у розрізі

Недостатня адгезія може призвести до утворення внутрішніх порожнин, які блокують потік води, що є критичним дефектом при пожежогасінні.

Оцінка стійкості до впливу високих температур і контакту з нагрітими поверхнями імітує реальні умови пожежі, коли рукав може контактувати з розпеченими конструкціями. Здатність витримувати такі впливи протягом певного часу забезпечує безперервність подачі води та підвищує шанси на локалізацію займання.

Важливими є також випробування на гнучкість за низьких температур та озоностійкість. Вони враховують експлуатацію ПКК у неопалюваних приміщеннях і вплив атмосферних факторів, які можуть спричинити крихкість матеріалів та утворення мікротріщин.

Ергономічні та механічні випробування спрямовані на врахування людського фактора. Визначення зусиль, необхідних для відкриття крана, розгортання рукава та керування стволом, гарантує можливість використання ПКК широким колом осіб у стресових умовах. Це особливо важливо для об'єктів з масовим перебуванням людей.

Механічна надійність елементів, зокрема перекидного ствола та барабана котушки, перевіряється шляхом ударних та статичних навантажень. Такі випробування моделюють випадкові удари, падіння та надмірні зусилля під час експлуатації, що дозволяє оцінити їхню

стійкість до пошкоджень і збереження функціональності.

Завершальним етапом є антикорозійні випробування, зокрема тест у сольовому тумані відповідно до [14]. Вони імітують тривалий вплив вологи та агресивного середовища, що є типовим для багатьох будівель. Стійкість до корозії забезпечує працездатність рухомих елементів і запірної арматури протягом усього терміну служби.

Таким чином, сукупність наведених випробувань формує науково обґрунтовану систему оцінювання надійності ПКК, яка враховує як фізичні процеси в матеріалах і конструкціях, так і поведінкові аспекти їх використання. Це дозволяє мінімізувати ризики відмови систем у критичний момент та забезпечити ефективне реагування на пожежу на початковій стадії її розвитку.

Технічні вимоги до ПКК доцільно обґрунтовувати з позиції ризик-орієнтованого підходу, враховуючи реальні умови експлуатації, ймовірні сценарії розвитку пожежі та фактори відмови системи.

Ключовим критерієм є тип пожежного рукава. Застосування ПКК із напівжорсткими рукавами на об'єктах підвищеного ризику безпосередньо регламентується [15]. Головна експлуатаційна перевага напівжорсткого рукава полягає у можливості подачі води без повного розмотування. Це гарантує практично миттєве введення системи в дію після відкриття вентиля, скорочуючи час реагування на 40-60 секунд, що є

важливим на початковій стадії інтенсивного горіння.

Гідравлічні параметри системи безпосередньо визначають ефективність локалізації осередку займання. Згідно з [16], мінімальна витрата води на один струмінь має становити 2,5 л/с. Нормативний показник досягається використанням перекривних пожежних стволів із діаметром еквівалентного сопла близько 13 мм. Це формує компактний струмінь із дальністю від 10 м за робочого тиску 0,4 МПа. Такий гідравлічний режим створює оптимальний тепловий баланс процесу гасіння, генерує достатню кінетичну енергію струменя та дозволяє подавати вогнегасну речовину у віддалені зони навіть за умов складного планування будівель.

Ергономічні властивості ПКК прямо впливають на ефективність дій персоналу об'єкту, де виникла необхідність використання. Статистика застосування вказує, що складність експлуатації в стресовій ситуації є головною причиною низької ефективності систем внутрішнього водопостачання. Відповідно, конструкція ПКК має адаптуватися до антропометричних даних користувачів і специфіки замкнених просторів (вузькі коридори, сходові клітки). Раціональними технічними рішеннями є поворот катушки на 180°, зниження тягового зусилля під час розмотування рукава та використання шаф з антикорозійним захистом. Це запобігає заламам рукава, мінімізує гідравлічні втрати та стабілізує подачу води.

Умови реальної пожежі супроводжуються гідравлічними ударами, перепадами тиску та механічними навантаженнями, що підвищує ризик розгерметизації з'єднань або розриву рукава. Для мінімізації аварійних відмов коефіцієнт запасу міцності рукавів має становити не менше 3...4 від робочого тиску з обов'язковим тестуванням на герметичність. Крім того, тривалий вплив вологи, перепадів температур, УФ-випромінювання та агресивних середовищ спричиняє деградацію полімерних

компонентів. Технічні умови повинні жорстко регламентувати випробування матеріалів ПКК на прискорене старіння, термо-, озono- та корозійну стійкість для підтвердження їхнього експлуатаційного ресурсу [7-9].

Процес гармонізації національної нормативної бази з європейськими стандартами також створює проблему несумісності обладнання. Використання в Україні з'єднувальних головок типу «Богданова» формує технічну невідповідність із системою «Storz», що є стандартом у країнах ЄС, та обмежує взаємну сумісність пожежно-технічного обладнання. Ця технічна розбіжність блокує взаємозамінність компонентів та ускладнює інтеграцію європейського обладнання. Вирішенням проблеми є впровадження вимог щодо поетапної уніфікації з'єднань або обов'язкового комплектування систем відповідними перехідними адаптерами [2, 6].

Висновки та напрями подальших досліджень.

1. На основі аналізу статистичних даних встановлено, що фактична ефективність застосування ПКК є низькою (менше 0,1% від загальної кількості пожеж), що свідчить про невідповідність їх технічних характеристик реальним умовам експлуатації та потребує перегляду підходів до формування технічних вимог.

2. Визначено основні фактори, що обумовлюють низьку ефективність ПКК, зокрема: недостатня ергономічність конструкції, нестабільність гідравлічних параметрів, незадовільний технічний стан елементів системи та залежність від рівня підготовки користувачів.

3. На основі ризик-орієнтованого підходу обґрунтовано технічні вимоги до основних параметрів ПКК, зокрема щодо типу рукава (доцільність застосування напівжорстких рукавів), мінімальної витрати води (не менше 2,5 л/с), робочого тиску (0,2-0,6 МПа), ергономічних характеристик та запасу міцності елементів системи.

4. Встановлено взаємозв'язок між технічними вимогами та методами

випробувань, що дозволяє розглядати систему випробувань як інструмент підтвердження функціональної надійності ПКК з урахуванням реальних умов експлуатації, включаючи гідравлічні, механічні та кліматичні впливи.

5. Обґрунтовано необхідність гармонізації національних технічних вимог із європейськими підходами, зокрема щодо уніфікації з'єднувальних елементів (перехід від системи «Богданова» до «Storz» або застосування адаптерів), що дозволить забезпечити

сумісність обладнання, підвищити ефективність систем внутрішнього протипожежного водопостачання та усунути технічні бар'єри. Запропоноване нормативно-технічне регулювання дозволяє підвищити надійність внутрішнього протипожежного водопостачання.

Отримані результати є науковим підґрунтям для роботи профільних технічних комітетів, фахівців ДСНС та виробників.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kim M., Kong H. Performance evaluation of outlet types in indoor fire hydrant systems // *Journal of Fire Sciences*. 2026. Vol. 44, No. 2.
2. Петухова О. А., Горносталь С. А., Щербак С. М. Обґрунтування вибору характеристик складових пожежного кран-комплекту // *Проблеми пожежної безпеки*. 2017. Вип. 42. С. 95–100.
3. Петухова О. А., Щербак С. М. Визначення втрат напору плоскоскладаних рукавів, якими комплектуються пожежні кран-комплекти // *Проблеми пожежної безпеки*. 2016. Вип. 39. С. 196–200.
4. Петухова О. А., Горносталь С. А., Шаповалова О. О., Щербак С. М. Дослідження фактичних витрат води з пожежних кран-комплектів // *Проблеми пожежної безпеки*. 2016. Вип. 39. С. 190–195.
5. Коваль Р. Р., Твердохліб О. С., Ємельяненко С. О., Серeda Д. В., Несенюк Л. П. Порівняльне дослідження міжнародних технічних вимог до пожежних кран-комплектів: сучасний стан та перспективи уніфікації // *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2025. № 1(19). С. 129–141.
6. Коваль Р., Серeda Д., Несенюк Л. Аналіз та порівняння міжнародних стандартів щодо пожежних кран-комплектів // *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали XVI Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Черкаси, 02 трав. 2025 р.)*. Черкаси: НУЦЗ України, 2025. С. 64–66.
7. ДСТУ EN 671-1:2017. Стаціонарні системи пожежогасіння. Кран-комплекти пожежні. Частина 1. Кран-комплекти з напівжорсткими рукавами. Загальні вимоги (EN 671-1:2012, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017.
8. ДСТУ EN 671-2:2017. Стаціонарні системи пожежогасіння. Кран-комплекти пожежні. Частина 2. Кран-комплекти з плоскоскладаними рукавами. Загальні вимоги (EN 671-2:2012, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017.
9. ДСТУ EN 671-3:2017. Стаціонарні системи пожежогасіння. Кран-комплекти пожежні. Частина 3. Технічне обслуговування кран-комплектів з напівжорсткими і плоскоскладаними рукавами (EN 671-3:2009, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017.
10. ДСТУ EN 694:2019. Рукави пожежні. Напівжорсткі рукави для стаціонарних систем пожежогасіння (EN 694:2014, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019.
11. ДСТУ EN 14540:2019. Рукави пожежні. Плоскоскладані рукави, що не просочуються, для стаціонарних систем пожежогасіння (EN 14540:2014, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019.
12. ДСТУ EN 15889:2017. Пожежні рукави. Методи випробування (EN 15889:2011, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017.
13. Аналітичні довідки про пожежі та їх наслідки в Україні за 2014–2025 рр. [Електронний ресурс] / Інститут наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України. Режим доступу: <https://indcz.dsns.gov.ua/statistika-pozhezh> (дата звернення: [вказати дату]).
14. EN ISO 9227:2022. Corrosion tests in artificial atmospheres — Salt spray tests. Geneva: International Organization for Standardization, 2022. 28 p.
15. ДБН В.2.5-56:2014. Системи протипожежного захисту. Київ: Мінрегіон України, 2015.
16. ДБН В.2.5-64:2012. Внутрішній водопровід та каналізація. Частина I. Проектування. Частина II. Будівництво. Київ: Мінрегіон України, 2013.

REFERENCES

1. Kim, M., & Kong, H. (2026). Performance evaluation of outlet types in indoor fire hydrant systems. *Journal of Fire Sciences*, 44(2).
2. Petukhova, O. A., Hornostal, S. A., & Shcherbak, S. M. (2017). Obgruntuvannya vyboru kharakterystyk skladovykh pozhezhnoho kran-komplektu [Justification of selecting characteristics of fire hose reel components]. *Problemy pozhezhnoi bezpeky*, 42, 95–100.
3. Petukhova, O. A., & Shcherbak, S. M. (2016). Vyznachennia vtrat naporu ploskoskladanykh rukaviv, yakymy komplektuiutsia pozhezhni kran-komplekty [Determination of pressure losses in lay-flat hoses used in fire hose reels]. *Problemy pozhezhnoi bezpeky*, 39, 196–200.
4. Petukhova, O. A., Hornostal, S. A., Shapovalova, O. O., & Shcherbak, S. M. (2016). Doslidzhennia faktychnykh vytrat vody z pozhezhnykh kran-komplektiv [Study of actual water flow rates from fire hose reels]. *Problemy pozhezhnoi bezpeky*, 39, 190–195.

5. Koval, R. R., Tverdokhlib, O. S., Yemelianenko, S. O., Sereda, D. V., & Nesenjuk, L. P. (2025). Porivnialne doslidzhennia mizhnarodnykh tekhnichnykh vymoh do pozhezhnykh kran-komplektiv: suchasnyi stan ta perspektyvy unifikatsii [Comparative study of international technical requirements for fire hose reels: Current state and prospects for harmonization]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, 1(19), 129–141.
6. Koval, R., Sereda, D., & Nesenjuk, L. (2025). Analiz ta porivniannia mizhnarodnykh standartiv shchodo pozhezhnykh kran-komplektiv [Analysis and comparison of international standards for fire hose reels]. In *Teoriia i praktyka hasinnia pozhezh ta likvidatsii nadzvychainykh sytuatsii: Materialy XVI Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii* (pp. 64–66). Cherkasy, Ukraine: NUTsZU Ukrainy.
7. DSTU EN 671-1:2017. (2017). Statsionarni systemy pozhezhohasinnia. Kran-komplekty pozhezhni. Chastyna 1. Kran-komplekty z napivzhorstkymy rukavamy. Zahalni vymohy [Fixed firefighting systems. Hose reel systems. Part 1. Hose reels with semi-rigid hose. General requirements].
8. DSTU EN 671-2:2017. (2017). Statsionarni systemy pozhezhohasinnia. Kran-komplekty pozhezhni. Chastyna 2. Kran-komplekty z ploskoskladanyky rukavamy. Zahalni vymohy [Fixed firefighting systems. Hose reel systems. Part 2. Hose reels with lay-flat hoses. General requirements].
9. DSTU EN 671-3:2017. (2017). Statsionarni systemy pozhezhohasinnia. Kran-komplekty pozhezhni. Chastyna 3. Tekhnichne obsluhovuvannia kran-komplektiv z napivzhorstkymy i ploskoskladanyky rukavamy [Fixed firefighting systems. Hose reel systems. Part 3. Maintenance of hose reels with semi-rigid and lay-flat hoses].
10. DSTU EN 694:2019. (2019). Rukavy pozhezhni. Napivzhorstki rukavy dlia statsionarnykh system pozhezhohasinnia [Fire hoses. Semi-rigid hoses for fixed firefighting systems].
11. DSTU EN 14540:2019. (2019). Rukavy pozhezhni. Ploskoskladani rukavy, shcho ne prosochuiutsia, dlia statsionarnykh system pozhezhohasinnia [Fire hoses. Non-percolating lay-flat hoses for fixed firefighting systems].
12. DSTU EN 15889:2017. (2017). Pozhezhni rukavy. Metody vyprovuvannia [Fire hoses. Test methods].
13. Instytut naukovykh doslidzhen z tsyvilnoho zakhystu Natsionalnoho universytetu tsyvilnoho zakhystu Ukrainy. (2025). Analitichni dovidky pro pozhezhni ta yikh naslidky v Ukraini 2014–2025 rr. [Analytical reports on fires and their consequences in Ukraine, 2014–2025]. <https://indez.dsns.gov.ua/statistika-pozhezh>
14. International Organization for Standardization. (2022). EN ISO 9227:2022. Corrosion tests in artificial atmospheres—Salt spray tests.
15. DBN V.2.5-56:2014. (2015). Systemy protypozhezhnoho zakhystu [Fire protection systems].
16. DBN V.2.5-64:2012. (2013). Vnutrishnii vodoprovod ta kanalizatsiia. Chastyna I. Proektuvannia. Chastyna II. Budivnytstvo [Internal water supply and sewerage. Part I. Design. Part II. Construction].

EFFICIENCY EVALUATION AND TECHNICAL REGULATION FOR FIRE FIGHTING HOSES FOR FIXED SYSTEMS

Koval R.¹, Koval N.¹, Sereda D.¹, Nesenjuk L.¹, Yemelianenko S.², Koval I.²

¹*Institute of Scientific Research on Civil Protection of the National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine*

²*Lviv State University of Life Safety, Ukraine*

KEYWORDS: ABSTRACT

statistical analysis of fires, technical regulation, hydraulic parameters, ergonomics, risk-oriented approach.

This article presents the results of evaluating the efficiency of fire hose systems (FHS) based on an analysis of statistical datasets regarding fires in Ukraine, along with a justification of directions for their technical regulation. The methodological framework of the study comprises a statistical analysis of FHS application, a systems analysis of the regulatory framework, and the implementation of a risk-based approach. It has been established that the actual efficiency of utilizing FHS as first-aid firefighting equipment is extremely low, indicating a discrepancy between their technical characteristics and operational properties and real-world operational conditions. Based on the analysis of statistical data and factors influencing FHS operational efficiency (ergonomic limitations, instability of hydraulic parameters, technical condition, and design features), the key operational problems of internal fire water supply systems have been identified. The technical requirements and testing methods for fire hose systems have been systematized in accordance with the European EN series standards, and their role has been defined. Directions for improving technical regulation have been justified, particularly concerning flow and pressure parameters, ergonomic characteristics, component reliability, and ensuring the compatibility of connecting fittings in the context of harmonization with European practices (transitioning from the "Bogdanov" coupling system to "Storz" or utilizing adapters). The obtained results can be applied to improve the national regulatory framework, enhance the efficiency of internal fire water supply systems, and eliminate technical barriers in the circulation of fire-technical products.

УДК 614.841

ВОГНЕГАСНІ ВИПРОБУВАННЯ НОВОЇ ВОДНОЇ ВОГНЕГАСНОЇ РЕЧОВИНИ

DOI: 10.52363/2518-1777-2026-21-13

Пархоменко В.-П. О., ORCID iD 0000-0001-7431-4801

Михалічко Б. М., ORCID iD 0000-0002-5583-9992

Лавренюк О. І., ORCID iD 0000-0003-4509-2896

Пархоменко Р. В., ORCID iD 0009-0008-2954-6767

Пастухов П. В., ORCID iD 0000-0002-3140-1101

Пархоменко Ю. П., ORCID iD 0009-0006-3387-3504

*E-mail: pvrp2018@gmail.com

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції:

10.04.2026

Прийнято: 06.05.2026

Опубліковано:

30.05.2026

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

водна вогнегасна речовина,
амоній карбонат, гасіння пожеж
класу В.

АНОТАЦІЯ

Сучасний технологічний прогрес супроводжується зростанням пожежної небезпеки матеріалів з високими тепловими ефектами горіння, що зумовлює необхідність розробки ефективних вогнегасних засобів. Метою дослідження є експериментальне вивчення вогнегасної ефективності нової водної вогнегасної речовини (ВВР) на основі 50% водно-аміачного розчину амоній карбонату для гасіння пожеж класу «В». У роботі проаналізовано сучасні підходи до модифікації водних вогнегасних речовин хімічними добавками (солі, фосфати, бікарбонати, наночастинки, полімери, рідке скло), які забезпечують охолодження, інгібування, ізоляцію та запобігання повторному займанню. Розроблена ВВР синтезована шляхом розчинення амоній карбонату в 25% водному розчині амоніаку. Фізико-хімічні характеристики речовини визначено гравіметричним методом: густина становить 1,26 г/см³, молярна концентрація – 6,55 моль/л, температура замерзання -58 °С, рН – 12,1. Вогневі випробування проводили на модельному вогнищі 21В (площа 0,66 м²) з використанням автомобільного бензину А-92 Євро-5 Е5 та дизельного палива відповідно до стандартизованої методики. Гасіння здійснювали аерозольним методом за допомогою спеціально розробленої установки. Порівняння проводили з 36% водним розчином карбонату калію та водогінною водою. Експериментально встановлено, що при гасінні бензину нова ВВР забезпечує ліквідацію полум'я за 2 секунди з витратою 280 мл, що в 5 разів швидше і в 4 рази економніше порівняно з розчином К₂СО₃. При гасінні дизельного палива осередок пожежі повністю ліквідовано за 30 секунд з витратою 4200 мл, тоді як аналоги не впоралися з завданням. Висока ефективність зумовлена поєднанням охолоджувального ефекту, хімічного інгібування та виділення негорючих газів при термічному розкладанні амоній карбонату. Отримані результати підтверджують перспективність використання розробленої ВВР для оперативного гасіння пожеж класу «В» з мінімальною витратою речовини. Подальші дослідження спрямовані на оптимізацію складу, розширення сфер застосування на пожежі класу А, оцінку екологічної безпеки та адаптацію до промислового виробництва.

Постановка проблеми. Сучасний технологічний прогрес призводить до активного використання нових матеріалів

з високою пожежною небезпекою та значними тепловими ефектами горіння. Це зумовлює необхідність створення

сучасних вогнегасних засобів, які забезпечують швидку та ефективну ліквідацію пожеж різних класів, зменшують теплове навантаження на пожежників і дозволяють оперативно охолоджувати осередок займання.

Водні вогнегасні речовини (ВВР) посідають одне з провідних місць серед засобів пожежогасіння завдяки своїм унікальним властивостям і доступній вартості. Вони вважаються найбільш універсальними, екологічно безпечними та економічно вигідними засобами передусім завдяки високій теплоємності води, її здатності інтенсивно поглинати теплоту при випаровуванні, а також можливості розчиняти неорганічні солі, які виявляють інгібуючу дію на полум'я. Застосування ВВР дає змогу ефективно знижувати температуру в зоні горіння, запобігати повторному займанню матеріалів і проводити гасіння на значних територіях без надмірних витрат. Саме тому такі речовини залишаються базовим інструментом для підрозділів оперативно-рятувальної служби цивільного захисту [1-4].

Актуальність подальшого вдосконалення ВВР пов'язана з можливістю суттєвого підвищення їхньої ефективності шляхом введення спеціальних хімічних модифікаторів. Такі добавки знижують поверхневий натяг розчинів, сповільнюють випаровування, покращують змочування та проникнення у глибину горючих матеріалів. Модифіковані водні розчини демонструють кращі тепловідвідні властивості, вищу стабільність у широкому діапазоні температур і дозволяють гасити пожежі різних класів з меншою витратою речовини.

Отже, створення нових удосконалених водних вогнегасних речовин є важливим науковим і практичним завданням. Воно спрямоване на підвищення рівня безпеки особового складу, скорочення часу ліквідації пожеж та забезпечення більш ефективного реагування на сучасні пожежні ризики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розробці нових ВВР та вивченню їх ефективності гасіння пожеж різних класів присвячено безліч робіт. Так у роботах [5-13] висвітлено ефективних напрямків покращення властивостей ВВР з використання хімічних інгібіторів горіння. Зокрема, додавання до складу ВВР таких добавок, як калій хлорид (KCl 3-5 %), натрій хлорид ($NaCl$ 5-10 %), амоній фосфати $((NH_4)_3PO_4, (NH_4)_2HPO_4$ 5-10 %), натрій та калій бікарбонати ($NaHCO_3, KHCO_3$ 5-35 %), полігексаметиленгуанідин (ПГМГ 5 %) та наночастинки силіцій(IV) оксид (SiO_2 2-5 %) і алюміній оксид (Al_2O_3 2-5 %) зумовлює комплексну дію на процес гасіння. Вона полягає в охолодженні зони горіння, розбавленні кисню негорючими газами (CO_2, N_2, H_2O), хімічному гальмуванні ланцюгових реакцій шляхом дезактивації вільних радикалів $H\cdot$ і $\cdot OH$, а також утворенні ізолюючої плівки на поверхні горючого матеріалу.

Результати вогневих випробувань ВВР з KCl (3-5 %) у поєднанні з гліцерином при гасінні низових лісових пожеж скорочує час гасіння на 30-40 %. ВВР в поєднанні з $NaCl$ (5-10 %) є ефективною при гасінні дизельного біопалива та ЛПЕЖ, а у комбінації з 0,5 % ПАР час полум'яного горіння ЛПЕЖ зменшується на 40-50 %, температура – на 50-60 %, а швидкість тепловиділення – на 35-45 %. Застосування ВВР з амоній фосфатами (5-10 %) при гасінні лісових пожеж на площі 10 м² призводить до скорочення часу гасіння з 20-30 хв до 8-12 хв (на 50-60 %), зменшення температури на 40-50 % і витрати на 30-40 %, запобігаючи повторному займанню протягом щонайменше 10 хв. Використання бікарбонатів (5-35 %) зумовлює зниження тиску вибуху пилоповітряних сумішей на 30-35 %, швидкості поширення полум'я – на 35-45 %, а при гасінні ЛПЕЖ зменшення температури на 25-35 % і витрати на 20-30 %. Наночастинки SiO_2 та Al_2O_3 (2-5 %), які дисперговані ультразвуком протягом 20-60 хв, поглинають тепло, створюють термічний бар'єр і каталізують утворення

негорючих газів, скорочуючи час гасіння метану на 25-35 % і запобігаючи повторному займанню впродовж 5-10 хв.

Результати експериментальних досліджень [14] модифікування ВВР полімерами поліакрилату (Есофлос А-07 та А-18) суттєво перевершують чисту воду за адгезією (у 7-8 разів) та здатністю утворювати захисну гелеву плівку товщиною 0,0032-0,021 мм, що забезпечує ефективну ізоляцію від кисню та охолодження поверхонь. В'язкість гідрогелів варіювалася від 1 до 21 723 сП залежно від концентрації (0,01-0,5 %) і проявляла псевдопластичні та тиксотропні властивості, дозволяючи стабільне розпилення пожежними стволами. Час набухання часток полімеру суттєво залежав від фракційності (від 10 с для < 63 мкм до 270 с для > 500 мкм), а оптимальна однорідність фракцій 10-200 мкм зменшувала агрегацію. Додатки (КМЦ, SiO₂, Span-80) дозволили регулювати стійкість та кратність піни, а дисперсія полімерів в олії забезпечила сумісність з піноутворювачами. Загалом експерименти підтвердили високу ефективність розроблених ВВР для гасіння пожеж класів А та В за рахунок одночасного охолодження, ізоляції та запобігання повторному займанню при мінімальній витраті речовини.

Ефективність ВВР модифіковані натрієвим склом показано в роботі [15], де в результаті такого поєднання утворюються ефективні гелеутворювальні системи, які одночасно забезпечують охолодження, розбавлення горючого середовища та хімічне інгібування полум'я. Оптимальні склади з вмістом рідкого скла близько 12 % і поташу 12 %, доповнені плівкоутворювальним поверхнево-активним речовинам типу AFFF (0,2 %), показали кращу адгезію до поверхонь, підвищену змочувальну здатність і проникнення в глибину горючих матеріалів порівняно з чистою водою. Лабораторні та натурні випробування підтвердили скорочення часу гасіння пожеж та суттєве зниження ризику повторного займання. Отримані

дані обґрунтовують перспективність застосування таких гелеутворювальних композицій для вдосконалення засобів пожежогасіння класів А і підвищення ефективності протипожежного захисту.

Методи дослідження. Методологія проведення експериментальних досліджень водної вогнегасної речовини відповідно до стандартизованої методики [16]. Аналітичний метод обробки результатів дослідження.

Формулювання мети досліджень. Метою дослідження є проведення експериментальних досліджень ефективності нової водної вогнегасної речовини та визначити основні параметри гасіння.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для приготування водної вогнегасної речовини (ВВР) як основний діючий компонент було використано амоній карбонат – неорганічну сіль, що широко застосовується в хімічному синтезі. У якості розчинника застосовували 25% водний розчин амоніаку.

Синтез концентрованого водно-аміачного розчину амоній карбонату базувався на високій хімічній спорідненості катіонів амонію з розчиненою у воді слабкою основою (NH₄OH), а також на здатності амоній гідроксиду ефективно пригнічувати гідроліз (NH₄)₂CO₃. Пригнічення гідролізу є критично важливим як під час приготування розчину, так і в процесі його подальшої експлуатації.

Отримана водна вогнегасна речовина являє собою 50% водно-аміачний розчин амоній карбонату і призначена для гасіння пожеж класу «В» методом аерозольного пожежогасіння.

Підготовка ВВР здійснювалась шляхом розчинення амоній карбонату у 25% водному розчині амоніаку. Зокрема, 50% розчин отримували шляхом додавання 100,1 масових частин (NH₄)₂CO₃ до 100 масових частин 25% водного розчину амоніаку (масове співвідношення компонентів 1:1). Практично це

реалізовувалося внесенням 10,4 моля (1001 г) амоній карбонату до 1 літра 25% аміачного розчину з подальшим перемішуванням при кімнатній температурі до повного розчинення солі. У процесі розчинення спостерігалось помітне охолодження розчину. Після відновлення кімнатної температури ВВР вважалася готовою до застосування.

Густина отриманого 50% водно-аміачного розчину амоній карбонату визначали гравіметричним методом: після зважування 1 см³ розчину вона становила 1,26 г/см³.

Фізико-хімічні властивості 50% водно-аміачного розчину амоній карбонату та значення молярної та молярної концентрацій наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Фізико-хімічні характеристики ВВР

ВВР	d (г/с м ³)	C_M (моль/ л)	C_m (моль/1к г розчинн ика)	$T_{\text{замерзання}}$ (°C)	pH
50% водно- аміачний розчин (NH ₄) ₂ CO	1,26	6,55	10,41	-58	12,1

Вогневі випробування проводились за стандартизованою методикою для визначення вогнегасної ефективності ВВР для гасіння пожеж класу В [16]. Експериментальні дослідження проводились на спеціалізованому відкритому майданчику для проведення вогневих випробувань на базі лабораторії пожежної безпеки Львівського державного університету безпеки життєдіяльності.

Умови проведення вогневих випробувань:

- температура довкілля під час проведення дослідів становила +15 °C;
- швидкість вітру повинна 2 м/с.

Настил майданчика для випробувань виконано з бетонних плит розміром 1,0 x 5,0 x 0,4 м, в центрі якого розміщувався осередок горіння, у вигляді циліндричного деко. Дана ємність відповідає модельному

вогнищу 21В з наступними характеристиками: об'єм рідини 21 л, внутрішній діаметр на рівні верхнього краю борта 920 мм, висота 150 мм, товщина стінок 2 мм, площа модельного вогнища пожежі 0,66 м².

Додатково використовувались мірна ємність для визначення витрат ВВР, пристрою для подачі в осередок горіння водного аерозолі та секундомір.

В якості пристрою для подачі ВВР в осередок горіння є власноруч розроблена установка, що складається з вогнегасника ємністю 5 л, насадки для подачі аерозолі ВВР, композитного балону з повітрям ємністю 6,8 л, оснащеного манометром.



Рисунок 1 – Схема установки для проведення вогнегасних випробувань ВВР:

1 – балон із стиснутим повітрям, 2 – манометр, 3 – вогнегасник переносний, 4 – насадка розприскувач, 5 – деко з горючою рідиною (вогнище класу «В»)

Оператор, який буде приводити в дію установку аерозольного гасіння, повинен бути забезпечений захисним одягом в цілях безпеки праці. В даному випадку використовувався захисний одяг пожежного (загального призначення), рукавиці пожежні та пожежна каска.

Відповідно до методики [16] посередині бетонного настилу розміщували деко, яке наповнювали на 2/3 об'єму водою, поверх якої наливали горючу рідину (1/3 об'єму) і підпалювали. Як горючу речовину використовували бензин автомобільний А-92 Євро-5 Е5 та дизельне паливо характеристики яких відповідають Державним стандартам України [17-18].

Вільне горіння тривало 60 с до моменту закипання горючої рідини, після чого в осередок горіння вносили аерозоль ВВР. Для забезпечення відтворюваності та достовірності результатів проводять щонайменше 3 випробування для кожного варіанту умов експерименту. Оператор визначав середній час гасіння (Δt , с) та середній об'єм ВВР витраченої на гасіння (V , мл) порівняно із 36% водним розчином K_2CO_3 [19] та водогінною водою.

Результати проведення вогневих випробувань ефективності ВВР подані в табл. 4.

Таблиця 4 – Результати експериментальних досліджень

ВВР	Бензин автомобільний А-92 Євро-5 Е5		Дизельне паливо	
	V , мл	Δt , с	V , мл	Δt , с
50% водно-аміачний розчин $(NH_4)_2CO_3$	280	2	4200	30
36% водний розчин K_2CO_3	1150	10	3450	30*
Водогінна вода	4930	29*	4930	29*

* гасіння полум'я не відбулося; за вказаний проміжок часу повністю вичерпалась ВВР

Отже, експериментальні дослідження показали, що гасіння осередків пожеж класу В, зумовлених горінням автомобільного бензину, 50%-ним водно-аміачним розчином $(NH_4)_2CO_3$ порівняно з іншою ВВР – 36%-ним водним розчином K_2CO_3 відбувається у 5 разів швидше. Окрім того, використовуючи розроблену ВВР були загашені осередки пожеж класу В, зумовлених горінням дизельного палива, тоді як 36%-ним водним розчином K_2CO_3 та водогінною водою загасити такі осередки пожеж не вдалося.

Висновки і перспективи подальших розвитку у даному напрямку. Проведені експериментальні дослідження підтвердили високу вогнегасну ефективність розробленої 50% водно-аміачної вогнегасної речовини на основі

амоній карбонату для гасіння пожеж класу «В».

Отримані результати свідчать, що при гасінні модельного вогнища 21В з автомобільним бензином А-92 Євро-5 Е5 нова ВВР забезпечує гасіння за 2 секунди при витраті лише 280 мл розчину. Це в 5 разів швидше і потребує приблизно в 4 рази меншої витрати порівняно з 36% водним розчином карбонату калію (1150 мл, 10 с).

При гасінні дизельного палива перевага розробленої речовини є ще більш виразною: осередок пожежі вдалося повністю загасити за 30 секунд з витратою 4200 мл, тоді як 36% розчин K_2CO_3 та звичайна водогінна вода за аналогічний час не змогли ліквідувати полум'я і повністю вичерпалися.

Така висока ефективність зумовлена комплексною дією компонентів: охолоджувальним ефектом водної основи, інгібуючою дією амоній-іонів, а також виділенням негорючих газів (аміаку та діоксиду вуглецю) при термічному розкладанні амоній карбонату безпосередньо в зоні горіння. Це сприяє швидкому зниженню температури, розбавленню кисню та хімічному гальмуванню ланцюгових реакцій горіння. Фізико-хімічні характеристики розробленої ВВР (густина 1,26 г/см³, рН 12,1, температура замерзання –58 °С, висока молярна концентрація) роблять її придатною для застосування в широкому діапазоні температур, у тому числі в умовах низьких зимових температур, що є важливою перевагою порівняно з багатьма традиційними водними композиціями.

Таким чином, 50% водно-аміачний розчин амоній карбонату можна вважати перспективною вогнегасною речовиною для аерозольного гасіння пожеж класу «В», спричинених горінням легкозаймистих і горючих рідин (бензин, дизельне паливо), яка перевершує за ефективністю ряд відомих аналогових розчинів неорганічних солей.

Перспективи подальших досліджень у даному напрямку є: вивчення токсикологічних та екологічних аспектів

застосування ВВР, особливо з урахуванням можливого виділення аміаку, з метою забезпечення безпеки особового складу пожежно-рятувальних підрозділів; розробка технології промислового виробництва та стабілізації

концентрованого розчину для тривалого зберігання; полігонні випробування на реальних осередках пожеж більших масштабів, що будуть імітувати горіння резервуару на складах нафтопродуктів.

Конфлікт інтересів: Лавренюк О. І. є членом редакційної колегії журналу «Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека», але не брала жодної участі в процесі рецензування цієї статті, обговоренні чи прийнятті рішення щодо її публікації. Процедура розгляду рукопису повністю забезпечувалася незалежними членами редколегії та зовнішніми рецензентами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Карвацька М.Я., Лавренюк О.І., Михалічко Б.М. Сучасний стан і напрями вдосконалення водних вогнегасних речовин. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*, 2023. № 1 (15). С. 92-100. URL: [https://doi.org/10.52363/nvcz.2023.1\(15\).92-100](https://doi.org/10.52363/nvcz.2023.1(15).92-100).
2. Пархоменко В.-П.О., Михалічко Б.М., Лавренюк О.І., Пархоменко Р.В., Кравець І.П. Інноваційні розробки та сучасні методи підвищення ефективності водних вогнегасних розчинів за допомогою інгібіторів. *Пожежна безпека: зб. наук. пр.* Львів: ЛДУ БЖД, 2025. № 46. С. 97-105. URL: <https://doi.org/10.32447/20786662.46.2025.10>.
3. Пархоменко В.-П.О., Михалічко Б.М., Пархоменко Р.В. Сучасний стан використання у пожежогасінні та способи підвищення ефективності водних вогнегасних розчинів за допомогою змочувачів. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. Київ: ІДУ НД ЦЗ, 2025. № 1 (19). С. 80-87. URL: [https://doi.org/10.52363/nvcz.2025.1\(19\).79-88](https://doi.org/10.52363/nvcz.2025.1(19).79-88).
4. Anatolii Kodrik, Oleksandr Titenko, Sergiy Zhartovskyi, Andriy Borisov, Andriy Shvydenko Theoretical Prerequisites for Creating a Fire-Extinguishing Solution Based on Water-Absorbing Polymer Ecoflocf-07 for Extinguishing Fires in Ecosystems. *Key Engineering Materials*, 2022. Volume 927. P. 87-104. URL: <https://doi.org/10.4028/p-647f1v>.
5. Савельєв Дмитро Ігорович Підвищення ефективності гасіння низових лісових пожеж шляхом використання бінарних вогнегасних систем з роздільним подаванням: дис. на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: 21.06.02. Харків, 2020. 170 с.
6. Дадашов Ільгар Фірдосі огли Розвиток наукових основ гасіння горючих рідин твердими пористими матеріалами та гелеутворюючими системами: дис. на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук: 21.06.02. Харків, 2019. 391 с.
7. Скоробагатько Т. М., Антонов А. В., Боровиков В. О. Особливості процесів горіння дизельного біопалива, його сумішей з нафтовим дизельним паливом та процесів взаємодії вогнегасних речовин з полум'ям під час їх гасіння. *Інтернаука: Міжнародний науковий журнал. 2 т. Розділ Технічні науки*, 2019. № 11 (73). С. 52-63. URL: <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2019-11-5112>.
8. Du, C.Y., Yang, Y., Zhai, J., Zhai J., Yang X.-Z., Tang Y., Dong X.-L. Effectiveness evaluation of fine water mist venturi nozzle systems with composite additives in improving fire suppression in polyurethane fires. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2024. Volume 149. P. 13495-13510. URL: <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13666-8>.
9. Магльована Т.В. Фізико-хімічні властивості водних вогнегасних речовин на основі полігексаметиленгуанідину. *Пожежна безпека: теорія і практика: зб. наук. праць*, 2014. №17. С. 67-72.
10. Mark Vuozzo Fire inhibitor formulation. Patent US9920250B. USA, 2018.
11. Zhai, XW., Pan, WJ., Xiao, Y. Wang S., Ouyang L. Inhibition of coal spontaneous combustion by an environment-friendly, water-based fire extinguishing agent. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2021. Vol. 144. 325-334. URL: <https://doi.org/10.1007/s10973-020-10101-6>.
12. Zhang, M. Jialiang Liu, Yilin Lai, Hao Liu, Hao Chen, Maosong Fan, Mengmeng Geng. Fire Extinguishing Effect of Reignition Inhibitor on Lithium Iron Phosphate Storage Battery Module. The proceedings of the 10th Frontier Academic Forum of Electrical Engineering (FAFEE2022). FAFEE 2022. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. Springer, Singapore, 2023. Vol 1054. P. 703-711. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-99-3408-9_60.
13. Zhang, L., Jin, K., Sun, J. Wang, Q. A Review of Fire-Extinguishing Agents and Fire Suppression Strategies for Lithium-Ion Batteries Fire. *Fire Technology*, 2024. Vol. 60. P. 817-858. URL: <https://doi.org/10.1007/s10694-022-01278-3>.
14. Стилик І.Г., Пономаренко Р.В., Кодрик А.І., Тітенко О. М., Борисов А.В., Добростан О.В. Дослідження фізико-хімічних властивостей водних вогнегасних речовин на основі полімерів поліакрилату. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*, 2025. № 1 (19). С. 65-78. URL: [https://doi.org/10.52363/nvcz.2025.1\(19\).65-78](https://doi.org/10.52363/nvcz.2025.1(19).65-78).
15. Кодрик А.І., Коваленко В.В., Тітенко О.М., Борисов А.В., Стилик І.Г., Борисова А.С. Шляхи підвищення ефективності водних вогнегасних речовин на основі рідкого скла. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*, 2022. № 1(13). С. 24-34. URL: [https://doi.org/10.52363/nvcz.2022.1\(13\).24-34](https://doi.org/10.52363/nvcz.2022.1(13).24-34).
16. ДСТУ EN 3-7:2014 Вогнегасники переносні. Частина 7. Характеристики, вимоги до робочих параметрів і методи випробувань (EN 3-7:2004+A1:2007, IDT).
17. ДСТУ 7687:2015 Бензини автомобільні Євро. Технічні умови.
18. ДСТУ 7688:2015 Паливо дизельне Євро. Технічні умови.
19. Антонов А.В., Ковалишин В.В., Турчин А.І., Козяр Н.М. Водна вогнегасна речовина для гасіння тонкорозпиленними струменями пожеж класів "А" та "В" за ГОСТом 27331-87 з використанням від -30 до +50°C. Патент на корисну модель № 52969 Україна: У МПК А62D 1/02 (2006.01). № u200911293; заявл. 06.11.2009; опубл. 27.09.2009; бюл. № 18.

REFERENCES

1. Karvatska M.Ya., Lavreniuk O.I., Mykhalichko B.M. (2023). Suchasnyi stan i napriamy vdoskonalennia vodnykh vohnehasnykh rehovyn. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, 1 (15), 92-100. [in Ukrainian]. doi: [https://doi.org/10.52363/nvcz.2023.1\(15\).92-100](https://doi.org/10.52363/nvcz.2023.1(15).92-100).
2. Parkhomenko V.-P.O., Mykhalichko B.M. & Kravets I.P. (2025). Innovatsiini rozrobky ta suchasni metody pidvyshchennia efektyvnosti vodnykh vohnehasnykh rozchyniv za dopomohoiu inhibitoriv. *Pozhezhna bezpeka*, 46, 97-105. [in Ukrainian]. doi: <https://doi.org/10.32447/20786662.46.2025.10>.
3. Parkhomenko V.-P.O., Mykhalichko B.M., Parkhomenko R.V. (2025). Suchasnyi stan vykorystannia u pozhezhohasinni ta sposoby pidvyshchennia efektyvnosti vodnykh vohnehasnykh rozchyniv za dopomohoiu zmochuvachiv. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, 1 (19), 80-87. [in Ukrainian]. doi: [https://doi.org/10.52363/nvcz.2025.1\(19\).79-88](https://doi.org/10.52363/nvcz.2025.1(19).79-88).
4. Anatolii Kodrik, Oleksandr Titenko & Andriy Shvydenko (2022). Theoretical Prerequisites for Creating a Fire-Extinguishing Solution Based on Water-Absorbing Polymer Ecoflocf-07 for Extinguishing Fires in Ecosystems. *Key Engineering Materials*, 927, 87-104. doi: <https://doi.org/10.4028/p-647f1v>.
5. Saveliev D. I. (2020). Pidvyshchennia efektyvnosti hasinnia nyzovykh lisovykh pozhezh shliakhom vykorystannia binarnykh vohnehasnykh system z rozdilnym podavanniam: PhD Dissertation. Kharkiv.
6. Dadashov I. F. (2019). Rozvytok naukovykh osnov hasinnia horiuchykh ridyn tverdymy porystymy materialamy ta heleutvoriuichymy systemamy: Doktor Dissertation. Kharkiv.
7. Skorobahatko T.M., Antonov A.V., Borovykov V.O. (2019). Osoblyvosti protsesiv horinnia dyzelnoho biopalyva, yoho sumishei z naftovym dyzelnym palyvom ta protsesiv vzaiemodii vohnehasnykh rehovyn z polumiam pid chas yikh hasinnia. *Internauka: Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal*, 2 t. Rozdil Tekhnichni nauky, 11 (73), 52-63. [in Ukrainian]. doi: <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2019-11-5112>.
8. Du, C.Y., Yang, Y. & Dong X.-L. (2024). Effectiveness evaluation of fine water mist venturi nozzle systems with composite additives in improving fire suppression in polyurethane fires. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 149, 13495-13510. doi: <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13666-8>.
9. Mahlova T.V. (2014). Fyzyko-khimichni vlastyvoli vodnykh vohnehasnykh rehovyn na osnovi poliheksametylenhuanidynu. *Pozhezhna bezpeka: teoriia i praktyka: zb. nauk. prats*, 17, 67-72.
10. Mark Vuozzo (2018). Fire inhibitor formulation. Patent US9920250B.
11. Zhai, X.W., Pan, W.J. & Ouyang L. (2021). Inhibition of coal spontaneous combustion by an environment-friendly, water-based fire extinguishing agent. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 144, 325-334. doi: <https://doi.org/10.1007/s10973-020-10101-6>.
12. Zhang, M. Jialiang Liu & Mengmeng Geng (2023). Fire Extinguishing Effect of Reignition Inhibitor on Lithium Iron Phosphate Storage Battery Module. The proceedings of the 10th Frontier Academic Forum of Electrical Engineering (FAFEE2022). FAFEE 2022. Lecture Notes in Electrical Engineering. Springer, Singapore, 1054, 703-711. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-99-3408-9_60.
13. Zhang, L., Jin, K., Sun, J. & Wang, Q. (2024). A Review of Fire-Extinguishing Agents and Fire Suppression Strategies for Lithium-Ion Batteries Fire. *Fire Technology*, 60, 817-858. doi: <https://doi.org/10.1007/s10694-022-01278-3>.
14. Stylyk I.H., Ponomarenko R.V. & Dobrostan O.V. (2025). Doslidzhennia fyzyko-khimichnykh vlastyvolei vodnykh vohnehasnykh rehovyn na osnovi polimeriv poliakrylatu. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, 1 (19), 65-78. doi: [https://doi.org/10.52363/nvcz.2025.1\(19\).65-78](https://doi.org/10.52363/nvcz.2025.1(19).65-78).
15. Kodryk A.I., Kovalenko V.V. & Borysova A.S. (2022). Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti vodnykh vohnehasnykh rehovyn na osnovi ridkoho skla. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, 1(13), 24-34. doi: [https://doi.org/10.52363/nvcz.2022.1\(13\).24-34](https://doi.org/10.52363/nvcz.2022.1(13).24-34).
16. DSTU EN 3-7:2014 Vohnehasnyky perenosni. Chastyna 7. Kharakterystyky, vymohy do robochykh parametriv i metody vyprobuvan (EN 3-7:2004+A1:2007, IDT).
17. DSTU 7687:2015 Benzyny avtomobilni Yevro. Tekhnichni umovy.
18. DSTU 7688:2015 Palyvo dyzelne Yevro. Tekhnichni umovy.
19. Antonov A.V., Kovalyshyn V.V., Turchyn A.I., Koziar N.M. Vodna vohnehasna rehovyna dlia hasinnia tonkorozpylenymy strumeniamy pozhezh klasiv "A" ta "V" za HOSTom 27331-87 z vykorystanniam vid -30 do +50°C. Patent na korysnu model № 52969 Ukraina: U MPK A62D 1/02 (2006.01). № u200911293; zaiavl. 06.11.2009; opubl. 27.09.2009; biul. № 18.

FIRE SUPPRESSION TESTS OF A NEW WATER-BASED FIRE SUPPRESSANT

V.-P. Parkhomenko, B. Mykhalichko, H. Lavrenyuk, R. Parkhomenko, P. Pastukhov, Y. Parkhomenko

Lviv State University of Life Safety, Ukraine

KEYWORDS: ABSTRACT

water-based
fire-
extinguishing
agent,
ammonium
carbonate,
Class B fire
extinguishing.

Modern technological progress is accompanied by an increase in the fire hazard of materials with high thermal effects of combustion, which necessitates the development of effective fire-extinguishing agents. The aim of the study is the experimental investigation of the fire-extinguishing efficiency of a new water-based fire-extinguishing agent (WFA) based on a 50% aqueous-ammonia solution of ammonium carbonate for extinguishing Class B fires. The paper analyzes current approaches to modifying water-based fire-extinguishing agents with chemical additives (salts, phosphates, bicarbonates, nanoparticles, polymers, and liquid glass), which provide cooling, inhibition, isolation, and prevention of re-ignition. The developed WFA was synthesized by dissolving ammonium carbonate in a 25% aqueous ammonia solution. The physicochemical characteristics of the agent were determined by the gravimetric method: density is 1.26 g/cm³, molar concentration is 6.55 mol/L, freezing point is -58 °C, and pH is 12.1. Fire tests were conducted on a Model 21B fire pan (area 0.66 m²) using A-92 Euro-5 E5 automotive gasoline and diesel fuel in accordance with the standardized methodology. Extinguishing was performed by the aerosol method using a specially designed installation. The results were compared with a 36% aqueous solution of potassium carbonate and tap water. It was experimentally established that when extinguishing gasoline, the new WFA ensures flame elimination in 2 seconds with a consumption of only 280 ml, which is 5 times faster and approximately 4 times more economical compared to the K₂CO₃ solution. When extinguishing diesel fuel, the fire seat was completely eliminated in 30 seconds with a consumption of 4200 ml, whereas the reference agents failed to cope with the task. The high efficiency is due to the combination of the cooling effect, chemical inhibition, and the release of non-combustible gases (ammonia and carbon dioxide) during the thermal decomposition of ammonium carbonate. The obtained results confirm the prospects of using the developed WFA for rapid extinguishing of Class B fires with minimal consumption of the agent. Further research is aimed at optimizing the composition, expanding the scope of application to Class A fires, assessing environmental safety, and adapting the technology for industrial production.

УДК 614.841.345:006.83:519.2

ПРО СТВОРЕННЯ ВИПРОБУВАЛЬНОЇ БАЗИ З ПЕРЕВІРКИ ОКРЕМИХ ТЕХНІЧНИХ ВИМОГ ПОЖЕЖНОЇ ТА СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

DOI: 10.52363/2518-1777-2026-21-14

Доценко О. Г., ORCID iD 0000-0001-7437-8733
 Присяжнюк В. В., ORCID iD 0000-0002-9780-785X
 Семичаєвський С. В., ORCID iD 0000-0002-2413-5386
 Огурцов С. Ю., ORCID iD 0000-0003-3224-9436
 Якіменко М. Л., ORCID iD 0000-0003-4988-8015
 Тимошенко О.М., ORCID iD 0000-0001-7568-5030
 *E-mail: semich2006@ukr.net

Інститут наукових досліджень з цивільного захисту НУЦЗ України, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції:

11.04.2026

Прийнято: 02.05.2026

Опубліковано:

30.05.2026

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

випробувальна база, окремі технічні вимоги, стендове обладнання, концепція створення, багатоцільова випробувальна інфраструктура, спеціальне устаткування, спеціальні майданчики, засоби вимірювальної техніки, методи перевірки.

АНОТАЦІЯ

Визначено актуальність створення випробувальної бази в Україні з перевірки окремих технічних вимог пожежної та спеціальної техніки. Проаналізовано існуючі випробувальні бази провідних країн світу, які виконують перевірку та випробування у тому числі сертифікаційні пожежної та спеціальної техніки. Встановлено, що існуючі бази не в повній мірі реалізують весь комплекс робіт з перевірки сучасної техніки, а деякі з них спеціалізуються виключно на певних видах спеціальної техніки, наприклад перевірки висотної техніки. Наведено загальний вигляд деякого існуючого стендового обладнання для перевірки техніки. У статті представлено результати перевірки сучасної пожежної та спеціальної техніки, а саме: пожежних автоцистерн ємністю 5, 8 та 10 тон, піротехнічних машин легкого та важкого типів, пожежних автодрабин з висотою рятування 32 м, автомобілів газодимозахисної служби, автомобілів вантажних бортових та автокранів вантажопідйомністю 25, 35 та 50 тон, які виконано у 2025 році. За результатами перевірки техніки визначено основні недоліки такі як руйнування тросу лебідки та виходу з ладу її елементів, невідповідності робочої довжини тросу лебідки, кутів відкривання дверей кабіни особового складу, освітлення сходинок кабіни особового складу, звукових сигналів пріоритету техніки та неналежної роботи деяких елементів техніки, які призвели до її виходу з ладу та неможливості подальшої експлуатації. Наведено загальний вигляд техніки, що перевірявся. На підставі проведених аналітичних досліджень та практичної перевірки пожежної та спеціальної техніки з урахуванням актуальності сьогодення розроблено концепцію створення багатоцільової випробувальної інфраструктури до якої входять спеціальні майданчики (локації), випробувальні бокси. Визначено їх основне призначення та необхідну комплектацію засобами вимірювальної техніки та додатковим обладнанням, а також спеціальним устаткуванням для надійного функціонування. Опрацьовано базовий перелік обладнання, засобів вимірювальної техніки, обладнання та існуючих методів перевірки техніки, який необхідний для реалізації та функціонування випробувальної бази в Україні. Узагальнено та наведено доцільність та переваги створення випробувальної бази на території України.

Постановка проблеми. Для забезпечення високої якості пожежно-рятувальної техніки світова практика

передбачає суворе дотримання національних стандартів та використання сучасної випробувальної бази. Україна,

інтегруючись у європейський простір, впроваджує серію стандартів [1- 3], де [1] визначає класифікацію техніки, а [2] та [3] регламентують вимоги до її ключових технічних параметрів. Створення вітчизняної багатоцільової випробувальної інфраструктури потребує детального аналізу світового досвіду та розробки науково обґрунтованої концепції обладнання, що дозволить повноцінно реалізувати вимоги чинних нормативних актів.

Наразі критично важливим є питання створення власної випробувальної бази. Це завдання передбачає: дослідження досвіду провідних світових лабораторій, визначення переліку необхідного обладнання згідно з вимогами [2] та [3] та розробку концепції багатоцільової інфраструктури для верифікації технічних характеристик в Україні.

Враховуючи вищенаведене, набуває актуальності питання обґрунтування та розроблення відповідної концепції щодо створення на території України багатоцільової випробувальної інфраструктури для перевірки пожежної та спеціальної техніки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Аналіз глобального ринку засобів цивільного захисту свідчить, що фундаментом надійності пожежно-рятувальної техніки є багаторівнева система випробувань. У країнах Європейського Союзу цей процес забезпечується мережею потужних акредитованих лабораторій, що спеціалізуються на вузькопрофільних та комплексних дослідженнях.

Зокрема, у Німеччині центри VdS Schadenverhütung та TÜV SÜD реалізують повний цикл випробувань: від окремих компонентів (насосних установок, запірної арматури) до інтегрованих систем пожежогасіння. Випробування проводяться на спеціалізованих полігонах за чітко детермінованими сценаріями, що гарантує репрезентативність та високу достовірність результатів. У публікації [4] автори порівнюють корейські національні

вимоги (KFI) з міжнародними стандартами [5-7] щодо випробувань пожежних насосів. Результати цього дослідження використовуються для розробки нових сертифікаційних центрів у Південній Кореї та інших країнах, що прагнуть підвищити ефективність боротьби з вогнем.

Південно європейський кластер очолює іспанська лабораторія Applus+ Laboratories, яка володіє унікальною інфраструктурою для натурних випробувань великогабаритної техніки. Аналогічний підхід демонструє французька організація CNPP, чия випробувальна база дозволяє здійснювати верифікацію техніки в умовах, максимально наближених до реальних.

Трансформація стандартів: досвід США на відміну від європейської моделі, що базується на стандартах серії EN 1846, США у 2024 році здійснили кардинальну реформу нормативної бази. Національний стандарт [5] об'єднав розрізнені вимоги в єдиний консолідований регламент. Реалізацію цих вимог забезпечують світові лідери сертифікації такі як UL Solutions, FM Approvals, UL Fire Safety Research Institute та Intertek. Особливістю американської моделі є синергія між лабораторними дослідженнями та польовими випробуваннями: перевірка складних механізмів (підйомних пристроїв, електроніки) може проводитися безпосередньо на заводах-виробниках або в депо, що прискорює процес ітераційного вдосконалення техніки. У публікаціях вчених [8, 9, 10] наведені повномасштабні вимірювання експлуатаційних характеристик пожежного автомобіля в умовах інтенсивних лісових пожеж. Дані цих досліджень досі використовуються як база для проектування сучасних пожежних автоцистерн лісового типу, оскільки вони надали точні цифри щодо вдосконалення конструкції та експлуатації показників спеціалізованої техніки.

Водночас вищезазначені публікації не розкривають глобальних підходів до концептуального вирішення питань перевірки техніки пожежної та спеціальної техніки.

Виклики та стратегічні пріоритети для України незважаючи на спільну мету забезпечення якості існуючі світові бази різняться методологічними підходами та інструментарієм. Для України створення власної випробувальної інфраструктури є не лише питанням технічної відповідності, а й елементом національної безпеки.

З огляду на досвід 2022–2026 років, українська база має враховувати унікальний аспект: експлуатацію техніки в умовах екстремальних навантажень воєнного часу. Це включає: стійкість до вторинних факторів ураження: розробка методик перевірки техніки, що працює в зонах постійних обстрілів та завалів, адаптація до стандартів ЄС: забезпечення повної сертифікації згідно з EN 1846 для інтеграції українських виробників у європейський ринок та об'єктивний моніторинг: впровадження незалежного контролю тактико-технічних характеристик, що напряду впливають на виживання особового складу та швидкість ліквідації НС.

Тому набуває особливої актуальності питання створення в Україні сучасної випробувальної бази для перевірки окремих технічних вимог пожежної та спеціальної техніки. Цей процес має здійснюватися з урахуванням передового міжнародного досвіду та практичних аспектів експлуатації техніки в умовах екстремальних навантажень, що виникають під час ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій техногенного та воєнного характеру. Створення такого науково-дослідного комплексу дозволить не лише забезпечити повну відповідність вітчизняних засобів цивільного захисту стандартам ЄС (зокрема серії EN 1846), а й впровадити об'єктивний контроль тактико-технічних характеристик, які безпосередньо впливають на ефективність пожежогасіння та безпеку особового складу. Розбудова власної випробувальної інфраструктури стане фундаментом для інтеграції українських розробок у глобальний ринок безпеки та гарантуватиме надійність техніки у

вирішальні моменти рятувальних операцій.

Формулювання цілей дослідження. Метою дослідження є наукове обґрунтування та розроблення концепції створення в Україні багатоцільової випробувальної інфраструктури для перевірки пожежної та спеціальної техніки. Це має забезпечити об'єктивну оцінку тактико-технічних параметрів техніки на відповідність національним та європейським стандартам (зокрема серії EN 1846), враховуючи специфіку її експлуатації в умовах екстремальних навантажень техногенного та воєнного характеру.

Методи дослідження. В цій статті застосовано методологічну основу дослідження, яка дозволяє розглянути процес випробувань пожежної техніки як цілісну структуру, що поєднує нормативні вимоги, технічне забезпечення та реальні умови експлуатації. Використання порівняльно-аналітичного методу дало змогу адаптувати передовий досвід лабораторій ЄС та США до потреб української системи цивільного захисту.

Виклад основного матеріалу. На сучасному етапі розвитку систем цивільного захисту якості пожежної та спеціальної техніки визначається не лише її конструктивними особливостями, а й жорсткістю системи її верифікації. Проведені дослідження свідчать, що у країнах Європейського Союзу та США сформовано стійку архітектуру випробувальних центрів, які є незалежними арбітрами між виробником та кінцевим споживачем (рятувальними службами). У Німеччині діяльність центрів VdS Schadenverhütung та TÜV SÜD базується на комплексному підході: від лабораторної перевірки надійності окремих вузлів (наприклад, пожежних насосів за [6, 7]) до випробувань техніки в цілому. Важливим елементом є використання спеціалізованих полігонів із розробленими сценаріями, що імітують критичні режими експлуатації. В Іспанії лабораторія Applus+Laboratories виступає лідером у натурних випробуваннях

великогабаритної техніки, використовуючи унікальні майданчики для оцінки статичної та динамічної стійкості пожежних автодрабин та колінчастих підйомників.

Особливої уваги заслуговує досвід США, де у 2024-2025 роках відбулася консолідація стандартів у межах нормативу [5]. Це дозволило таким організаціям, як UL Solutions та FM Approvals, впровадити інтегровані методики контролю. Характерною рисою американської моделі є можливість проведення поелементних випробувань безпосередньо в місцях дислокації техніки (пожежних депо), що забезпечує постійний моніторинг технічного стану протягом усього життєвого циклу машини.

В Україні на сьогодні впроваджено серію національних стандартів [1, 2, 3], гармонізованих із європейськими нормами (зокрема серії EN 1846). Стандарт [1] чітко визначає класифікацію пожежної та спеціальної техніки, тоді як [2] та [3] регламентують параметри безпеки та ефективності. Проте аналіз існуючої інфраструктури свідчить про гостру дефіцитність сучасного стендового обладнання для повноцінної реалізації вимог цих стандартів.

Відсутність багатоцільової випробувальної бази призводить до того, що перевірка техніки під час закупівлі часто має формальний характер, що недопустимо в умовах підвищених навантажень.

Дотепер процедура оцінювання пожежної та спеціальної техніки в Україні мала переважно констатувальний та обмежений характер. Основним недоліком існуючого підходу була відсутність інструментальних методів поглибленого вимірювання технічних параметрів, що суттєво знижувало об'єктивність оцінки відповідності реальних характеристик задекларованим стандартам.

Процес перевірки техніки фактично обмежувався кількома поверхневими етапами:

Формальний аудит: перевірка наявності супровідної документації та

відповідності фактичної комплектації специфікаціям контракту.

Функціональний контроль: базова перевірка працездатності стаціонарних агрегатів (насосів, підйомних механізмів) та переносного обладнання без навантажувальних випробувань у граничних режимах.

Візуальна діагностика: органолептичний огляд базового шасі, вузлів та агрегатів на предмет видимих дефектів або пошкоджень.

Такий підхід не дозволяв виявити приховані дефекти та оцінити реальний ресурс техніки під час роботи в екстремальних умовах. Відсутність високоточних вимірювальних систем призводила до того, що ключові параметри - такі як енергоефективність гідравлічних систем, динамічна стабільність при маневруванні, точність дозування піноутворювача та стійкість електроніки до електромагнітних завад - залишалися поза увагою експертів. В результаті чого загальний відсоток виходу з ладу закупленої техніки в Україні за останні 3 роки склав 38 % з 519 одиниць пожежної та спеціальної техніки.

Зазначене підтверджує критичну потребу у відході від застарілих методів візуально-технічного огляду на користь створення багатоцільової випробувальної інфраструктури. Це дозволить впровадити в Україні європейську модель «доказової надійності», де кожен технічний параметр підтверджується результатами лабораторних та полігонних випробувань під навантаженням.

На сьогоднішній день на базі пожежно-випробувального полігону ІДУ НД ЦЗ НУЦЗ України запроваджено комплекс робіт спрямований на перевірку окремих технічних параметрів пожежної та спеціальної техніки, яка закуповується для територіальних підрозділів ДСНС України. Процес оцінювання відповідності пожежної та спеціальної техніки базувався на комплексному підході, що поєднує теоретичні нормативи та практичний досвід експлуатації. В основу перевірки покладено технічні вимоги, розроблені

провідними фахівцями-практиками територіальних підрозділів ДСНС України. Ці вимоги сформовані шляхом глибокого синтезу положень чинних національних стандартів [1, 2, 3] та реальних потреб рятувальних підрозділів, що виникають під час ліквідації надзвичайних ситуацій. Науковий супровід та інструменталізацію процесу забезпечили фахівці ІДУ НД ЦЗ НУЦЗ України, якими було реалізовано наступні кроки: розроблено низку спеціалізованих методик вимірювань, що охоплюють широкий спектр технічних і експлуатаційних показників, проведено детальне опрацювання та підготовку локацій (випробувальних майданчиків), технічні характеристики яких

відповідають вимогам розроблених методик.

Так протягом 2025 року перевірено 145 одиниць пожежної та спеціальної техніки, а саме: пожежні автоцистерни різної ємності 5, 8 та 10 тонн, піротехнічні машини легкого та важкого типів, автодрабин пожежні з висотою рятування 32 метри, автомобілі газодимозахисної служби, автомобілі вантажні бортові, автобуси пасажирські та автокрани з різною вантажопідйомністю 25, 35 та 50 тонн. На рисунку 1 наведено загальний вигляд пожежної та спеціальної техніки, яка перевірялась протягом 2025 року.





Рисунок 1 – Загальний вигляд пожежної та спеціальної техніки, яка перевірялась протягом 2025 року

Результати перевірки засвідчили, що 26 одиниць (близько 18 % від загальної кількості) мали суттєві технічні недоліки, які унеможливлювали їх негайну постановку на оперативне чергування. Характерними недоліками виявленими під час перевірки було наступне: зафіксовано випадки руйнування тягових тросів лебідок під навантаженням, а також невідповідність їхньої фактичної довжини заявленим технічним характеристикам. Такі дефекти є критичними, оскільки безпосередньо загрожують життю особового складу під час проведення аварійно-рятувальних робіт, виявлено порушення вимог стандартів щодо кутів відкривання дверей, недостатню інтенсивність освітлення сходинок кабіни та некоректну роботу пристроїв подачі звукових сигналів. Ці недоліки знижують ефективність оперативної роботи підрозділів у нічний час та в екстремальних умовах, встановлено невідповідність вогнегасників, якими укомплектована техніка, нормативним вимогам за типом або технічними характеристиками та найбільш вагомим дефектом стала некоректна робота окремих вузлів та агрегатів, яка під час випробувальних режимів призвела до повної втрати працездатності (виходу з ладу) техніки. Це унеможливило її подальшу експлуатацію без проведення капітального ремонту або заміни основних компонентів.

Виявлені невідповідності зумовили необхідність проведення повторних випробувань після доопрацювання, що вказує на нестабільність виробничих

процесів або недостатній заводський контроль якості.

На основі аналізу міжнародного досвіду та практики, розроблено концепцію багатоцільової випробувальної інфраструктури, що включає шість локацій для перевірки пожежної та спеціальної техніки. Перша локація - спеціалізований випробувальний бокс, що призначений для високоточних масогабаритних вимірювань, включаючи контроль лінійних розмірів, осевого розподілу маси та пожежно-технічного оснащення.

Проектне рішення даної локації спрямоване на забезпечення перевірки відповідності технічних характеристик об'єктів вимогам міжнародних та національних стандартів. Конструктивні особливості бокса дозволяють здійснювати комплексний моніторинг параметрів у контрольованих умовах, мінімізуючи вплив зовнішніх чинників на результати метрологічних процедур. Архітектурно-технічне рішення об'єкта, що ілюструє загальну компоновку та габаритні можливості для розміщення великогабаритної спецтехніки, візуалізовано на рисунку 2.

Інтеграція цієї локації у структуру випробувального полігону є критично важливою для встановлення реальних показників маневреності, навантаження на осі та ергономічності розміщення ПТО, що безпосередньо впливає на експлуатаційну безпеку під час виконання завдань за призначенням».



Рисунок 2 – Зовнішній вигляд випробувального бокса
Джерело: [11]

Наступним елементом експериментальної бази є спеціалізований випробувальний бокс, оснащений комплексом сучасної контрольно-вимірювальної апаратури для детермінації робочих параметрів пожежних насосних агрегатів. Технічне рішення локації передбачає наявність замкнутого гідравлічного контуру, інтегрованого з підземним резервуаром, що забезпечує стабільну подачу робочого тіла під час проведення гідравлічних випробувань. На рисунку 3 представлена тривимірна візуалізація архітектурно-планувального рішення бокса та конструктивні особливості заглибленої ємності, що дозволяє оцінити ергономіку розміщення обладнання та схему підключення випробувальних стендів до системи водопостачання.



Рисунок 3 – Тривимірна візуалізація випробувального бокса архітектурно-планувального рішення бокса та конструктивні особливості заглибленої ємності

Концепція модернізації науково-дослідного полігона передбачає

розгортання трьох відкритих випробувальних майданчиків, призначених для перевірки експлуатаційних характеристик пожежної та спеціальної техніки в умовах, наближених до реальних.

Перший сегмент бази відведено під спеціалізований стенд для визначення критичного кута нахилу, що є ключовим параметром при оцінці стабільності та поперечної стійкості великогабаритних транспортних засобів. Конструкція стенда являє собою похилу платформу з гідравлічним приводом, оснащену системою фіксації та датчиками кутового позиціонування. Дане обладнання дозволяє встановити граничні значення кутів нахилу, за яких виникає ризик перекидання техніки або порушення функціонування її робочих вузлів, що має критичне значення для безпеки проведення рятувальних робіт на складному рельєфі.

На рисунку 4 наведено зовнішній вигляд стенда для визначення критичного кута нахилу техніки.



Рисунок 4 – Зовнішній вигляд стенда для визначення критичного кута нахилу техніки
Джерело: [11]

Подальша розбудова інфраструктури об'єкта включає дві додаткові відкриті локації, функціональне призначення яких зосереджене на оцінці операційної ефективності спецтехніки в динамічних режимах.

Друга ділянка призначена для комплексних випробувань висотної пожежної техніки (автодрабин та

колінчастих підйомників). Технічні параметри цього майданчика дозволяють проводити верифікацію статичної та динамічної стійкості висувних конструкцій, а також перевірку систем автоматичного керування при граничних вильотах стріли.

Третя ділянка спроектована для апробації гідравлічних параметрів техніки під час подавання вогнегасних речовин. На цій локації здійснюється перевірка характеристик пожежних ручних та лафетних стволів. Візуалізація архітектурно-планувального рішення зазначених ділянок та їхнього взаємного розташування представлена на рисунку 5.



Рисунок 5 – Візуалізація архітектурно-планувального рішення відкритих ділянок для випробувань техніки

Концепція створення національної випробувальної інфраструктури має базуватися на трьох векторах: технічна оснащеність - створення стаціонарних комплексів для випробувань гідравлічних систем, засобів зв'язку та електрообладнання, а також закритих та відкритих треків для перевірки динаміки та маневреності, методологічна адаптація - врахування досвіду 2022–2026 років

щодо роботи техніки в умовах воєнного стану та інтеграційна спроможність - випробувальна база має стати майданчиком для сертифікації української техніки за стандартами ЄС, що відкриє шлях вітчизняним виробникам на міжнародні ринки.

Тому розроблення концепції багатоцільової випробувальної інфраструктури в Україні є невідкладним завданням. Це дозволить впровадити об'єктивний контроль тактико-технічних характеристик пожежної та спеціальної техніки, гарантувати безпеку особового складу під час виконання завдань за призначенням та забезпечити технологічний суверенітет держави у сфері цивільного захисту.

Висновки та напрями подальших досліджень.

1. Під час визначення загальносвітових підходів щодо створення випробувальної бази пожежної та спеціальної техніки встановлено, що сучасний вектор розвитку таких об'єктів базується на принципах комплексності, автоматизації та відтворення екстремальних умов експлуатації.

2. У ході дослідження обґрунтовано та визначено необхідність створення багатофункціональної випробувальної бази для перевірки окремих технічних вимог до пожежної та спеціальної техніки. Встановлено, що реалізація запропонованої концепції, яка поєднує закриті випробувальні бокси з підземними резервуарами та спеціалізовані відкриті майданчики, дозволяє забезпечити комплексний підхід до оцінки надійності пожежної та спеціальної техніки.

3. Розбудова сучасної багатоцільової випробувальної інфраструктури дозволить Україні перейти від ролі споживача закордонних технологій до ролі активного учасника глобального ринку безпеки. Створення такого науково-дослідного комплексу стане фундаментом для розробки інноваційних зразків техніки, здатної ефективно працювати у складних умовах техногенного та воєнного

характеру, гарантуючи надійність
рятувальних операцій у вирішальні
моменти.

Декларація про використання генеративного ШІ

Під час підготовки цієї роботи автори використовували інструмент ChatGPT для візуалізації архітектурно-планувальних рішень та тривимірної моделі (створення Рисунок 3 та 5). Після генерації зображень автори перевірили точність відображення даних та беруть на себе повну відповідальність за зміст статті.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ EN 1846-1:2025. Пожежні та аварійно-рятувальні транспортні засоби. Частина 1. Номенклатура та позначення (EN 1846-1:2011). [Чинний 2025-11-01]. Київ: ДП УкрНДНЦ, 2025. 10 с.
2. ДСТУ EN 1846-2:2025. Пожежно-рятувальні транспортні засоби. Частина 2. Загальні вимоги. Безпека та експлуатаційні характеристики (EN 1846-2:2024, IDT). [Чинний 2025-05-12]. Київ : ДП УкрНДНЦ, 2025. 78 с.
3. ДСТУ EN 1846-3:2018. Пожежно-рятувальні транспортні засоби. Частина 3. Стационарно встановлене устаткування. Безпека та експлуатаційні характеристики (EN 1846-3:2013, IDT). [Чинний 2019-10-01]. Київ : ДП УкрНДНЦ, 2018. 38 с.
4. Донг-Ха Чанг, Дже-Хьон Ку, Дже-Хан Чжон, Ву-Саб Лім (2021). Порівняння вітчизняних та іноземних технічних стандартів для оцінки необхідності створення системи випробувань продуктивності пожежних насосів високого тиску та високої витрати у пожежних машинах/ Пожежна наука та інженерія 35(4): 65-70. DOI: 10.7731/KIFSE.cc41f350.
5. NFPA 1900:2024 Standard for Aircraft Rescue and Firefighting Vehicles, Automotive Fire Apparatus, Wildland Fire Apparatus, and Automotive Ambulances. Document published on: 2024 –01–01. USA: NFPA. 2024. 380 p.
6. ДСТУ EN 1028-1:2019 Протипожежні насоси. Насоси протипожежні відцентрові з попередньою заливкою. Частина 1. Класифікація. Загальні вимоги та вимоги щодо безпеки (EN 1028-1:2002 + A1:2008, IDT). [Чинний 2021-01-01]. Київ : ДП УкрНДНЦ, 2021. 26 с.
7. ДСТУ EN 1028-2:2019 Протипожежні насоси. Насоси протипожежні відцентрові з попередньою заливкою. Частина 2. Контролювання загальних вимог та вимог щодо безпеки (EN 1028-2:2002 + A1:2008, IDT). [Чинний 2021-01-01]. Київ : ДП УкрНДНЦ, 2021. 24 с.
8. P.A. Bowditch, J. E. Leonard, D.J. O'Brien (2003) Full-scale Fire Truck Performance Measurements/ CSIRO Manufacturing & Infrastructure Technology, Highett, Victoria, Australia <https://www.researchgate.net/publication/237562190>.
9. Експериментальні дослідження адаптованих пожежних машин середньої вантажопідйомності для реагування на надзвичайні ситуації / І. А. Вікович та ін. *Журнал машинобудування та транспорт*. 2021. № 12 (2). С. 25–33. DOI: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2020-12-2-25-33>.
10. Алмазов К. Оцінка ризику перевіряння пожежної цистерни на нерівній лісовій місцевості. *Запобігання надзвичайним ситуаціям*. 2025. № 9 (1). С. 17–33. DOI: <https://doi.org/10.52363/2524-2636.2025.9.1.2>.
11. Tilt & Rollover Stability Testing. *Westest*. URL: <https://westest.ca/tilt-rollover-stability-testing/> (дата звернення: 05.02.2026).

REFERENCES

1. DSTU EN 1846-1:2025. Firefighting and emergency rescue vehicles. Part 1. Nomenclature and designations (EN 1846-1:2011). [Effective 11/01/2025]. Kyiv: State Enterprise UkrNDNC, 2025. 10 p.
2. DSTU EN 1846-2:2025. Fire and rescue vehicles. Part 2. General requirements. Safety and performance (EN 1846-2:2024, IDT). [Effective 2025-05-12]. Kyiv: State Enterprise UkrNDNC, 2025. 78 p.
3. DSTU EN 1846-3:2018. Fire and rescue vehicles. Part 3. Fixed equipment. Safety and performance (EN 1846-3:2013, IDT). [Effective 2019-10-01]. Kyiv: State Enterprise UkrNDNC, 2018. 38 p.
4. Dong-Ha Chang, Je-Hyun Koo, Je-Han Jeong, Woo-Sab Lim (2021). Comparison of domestic and foreign technical standards to assess the need for a performance testing system for high-pressure, high-flow fire pumps in fire trucks / Fire Science and Engineering 35(4): 65-70. DOI: 10.7731/KIFSE.cc41f350.
5. NFPA 1900:2024 Standard for Aircraft Rescue and Firefighting Vehicles, Automotive Fire Apparatus, Wildland Fire Apparatus, and Automotive Ambulances. Document published on: January 1, 2024. USA: NFPA. 2024. 380 p.
6. DSTU EN 1028-1:2019 Fire-fighting pumps. Pre-primed centrifugal fire-fighting pumps. Part 1. Classification. General and safety requirements (EN 1028-1:2002 + A1:2008, IDT). [Effective 2021-01-01]. Kyiv: State Enterprise UkrNDNC, 2021. 26 p.
7. DSTU EN 1028-2:2019 Fire pumps. Pre-primed centrifugal fire pumps. Part 2. General and safety requirements (EN 1028-2:2002 + A1:2008, IDT). [Effective 2021-01-01]. Kyiv: State Enterprise UkrNDNC, 2021. 24 p.
8. P.A. Bowditch, J. E. Leonard, D.J. O'Brien (2003) Full-scale Fire Truck Performance Measurements/ CSIRO Manufacturing & Infrastructure Technology, Highett, Victoria, Australia <https://www.researchgate.net/publication/237562190>.
9. Vikovich, I. A., Ziniko, R. V., Lavrivskiy, M. Z., & Poliakov, A. P. (2021). Experimental studies of adapted medium-duty fire trucks for emergency response. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*, 12(2), 25–33 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2020-12-2-25-33>
10. Almazov, K. (2025). Risk assessment of testing a fire tanker on uneven forest terrain. *Emergency Prevention*, 9(1), 17–33 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.52363/2524-2636.2025.9.1.2>
11. Westest. (n.d.). *Tilt & rollover stability testing*. <https://westest.ca/tilt-rollover-stability-testing/>

ON THE ESTABLISHMENT OF A TESTING FACILITY FOR VERIFYING SPECIFIC TECHNICAL REQUIREMENTS FOR FIREFIGHTING AND SPECIAL-PURPOSE VEHICLES

O. Dotsenko, V. Prisyazhnuk, S. Semychaievskyi, S. Ohurtsov, M. Yakimenko, O. Tymoshenko

Institute of Scientific Research on Civil Protection of the National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine

KEYWORDS: ABSTRACT

test facility,
specific
technical
requirements,
test bench
equipment,
design
concept,
multi-purpose
test
infrastructure,
specialized
equipment,
dedicated
test sites,
measuring
instruments,
verification
methods.

The need to establish a testing facility in Ukraine for verifying specific technical requirements of firefighting and specialized equipment has been identified. Existing testing facilities in leading countries around the world that conduct inspections and tests—including certification of firefighting and specialized equipment—have been analyzed. It has been established that existing facilities do not fully implement the entire range of work involved in testing modern equipment, and some of them specialize exclusively in certain types of special equipment, such as the testing of aerial equipment. An overview of some existing bench equipment for equipment inspection is provided. The article presents the results of inspections of modern firefighting and specialized equipment, namely: fire tankers with capacities of 5, 8, and 10 tons, light and heavy-duty pyrotechnic vehicles, fire ladder trucks with a rescue height of 32 m, gas and smoke protection service vehicles, flatbed trucks, and truck cranes with lifting capacities of 25, 35, and 50 tons, which were manufactured in 2025. The inspection of the equipment revealed the following major deficiencies: damage to the winch cable and malfunction of its components, non-compliance with the specified working length of the winch cable, the opening angles of the crew compartment doors, the lighting of the crew compartment steps, the vehicle's priority audible signals, and the improper operation of certain vehicle components, which led to its failure and the impossibility of further operation. A general overview of the tested equipment is provided. Based on analytical studies and practical testing of firefighting and specialized equipment, taking into account current relevance, a concept has been developed for creating a multi-purpose testing infrastructure that includes special sites (locations) and test bays. Their primary purpose and the necessary configuration of measuring instruments and additional equipment, as well as special equipment for reliable operation, have been defined. A basic list of equipment, measuring instruments, and existing methods for testing equipment, which is necessary for the implementation and operation of a testing facility in Ukraine, has been developed. The feasibility and advantages of establishing a test facility in Ukraine have been summarized and presented.

Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека

науковий журнал
ISSN 2518-1777

Підписано до друку 29.05.2026
Формат 60х90/8
Обл. вид. арк. —
Друк цифровий. Замовлення №____
Віддруковано згідно з наданим оригінал-макетом
ТОВ «Про формат»
Україна, 04080, м. Київ, вул. Кирилівська, 86
Реєстраційне свідоцтво ДК № 5942 від 11 січня 2018 р.
Тир. 50 прим.