



ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ БЕЗПЕКИ
ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

МАТЕРІАЛИ ДРУКУЮТЬСЯ УКРАЇНСЬКОЮ,
АНГЛІЙСЬКОЮ ТА ПОЛЬСЬКОЮ МОВАМИ

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

ПОЖЕЖНА БЕЗПЕКА

ЛДУБЖД

№ 47, 2025

заснований у 2002 році

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Паснак І.В., *головний редактор*, к.т.н., доц., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Лавренюк О.І.**, *заступник головного редактора*, д.т.н., доц., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Яковчук Р.С.**, *заступник головного редактора*, д.т.н., доц., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Пазен О.Ю.**, *відповідальний секретар*, к.т.н., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Баланюк В.М.**, д.т.н., доц., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Башинський О.І.**, к.т.н., доц., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Веселівський Р.Б.**, к.т.н., доц., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Вовк С.Я.**, к.т.н., доц., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Гашук П.М.**, д.т.н., проф., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Демчина Б.Г.**, д.т.н., проф., Національний університет «Львівська політехніка», Україна; **Домінік А.М.**, к.т.н., доц., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Ємельяненко С.О.**, к.т.н., старший дослідник, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Кирилів В.І.**, к.т.н., с.н.с., Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка, Україна; **Коваленко В.В.**, к.т.н., с.н.с., Інститут наукових досліджень з цивільного захисту, Україна; **Ковалишин В.В.**, д.т.н., проф., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Коваль М.С.**, д.пед.н., проф., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Козяр М.М.**, д.пед.н., проф., Член-кореспондент НАПН України, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Костенко В.К.**, д.т.н., проф., Донецький національний технічний університет МОН України, Україна; **Кузик А.Д.**, д.с.-г.н., проф., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Лозинський Р.Я.**, к.т.н., доц., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Лоїк В.Б.**, к.т.н., доц., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Михалічко Б.М.**, д.х.н., проф., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Попович В.В.**, д.т.н., проф., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Придатко О.В.**, к.т.н., доц., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Птак Сімон**, PhD, Головна школа пожежної служби, Польща; **Ратушний Р.Т.**, д.т.н., проф., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Ренкас А.А.**, к.т.н., доц., Державна служба України з надзвичайних ситуацій, Україна; **Тацій Р.М.**, д.ф.-м.н., проф., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Тригуба А.М.**, д.т.н., проф., Львівський національний аграрний університет, Україна; **Шукіс Ріголдас**, PhD, доц., Вільнюський технічний університет ім. Гедіміна, Литва; **Ярош Войцех**, PhD, Головна школа пожежної служби, Варшава, Польща.



Видавничий дім
«Гельветика»
2025

ISSN 2078-6662 (print)
ISSN 2708-1087 (online)

DOI: 10.32447/20786662.47.2025.00

ЗАСНОВНИКИ

Львівський державний університет
безпеки життєдіяльності (ЛДУБЖД)

Інститут наукових досліджень з цивільного захисту

ВИДАВЕЦЬ

Львівський державний університет
безпеки життєдіяльності (ЛДУБЖД)

ЗАРЕЄСТРОВАНО

Національною радою України з питань
телебачення та радіомовлення (рішення № 292
від 08.02.2024, ідентифікатор медіа R30-02253)

**СУБ'ЄКТ У СФЕРІ
ДРУКОВАНИХ МЕДІА**

Львівський державний університет безпеки
життєдіяльності (вул. Клепарівська, 35, м. Львів,
79007, ldubzh.lviv@dsns.gov.ua, тел. (032) 233-00-88)

**ВНЕСЕНО ДО ПЕРЕЛІКУ НАУКОВИХ ФАХОВИХ ВИДАНЬ УКРАЇНИ
ЯК ДРУКОВАНЕ ПЕРІОДИЧНЕ ВИДАННЯ КАТЕГОРІЇ «Б»**
(Наказ МОН України від 02.07.2020 року № 886)

ВНЕСЕНО ДО БІБЛОГРАФІЧНИХ БАЗ ДАНИХ:
«Наукова періодика України» в Національній бібліотеці України
ім. В.І. Вернадського, «ULRICH'S PERIODICALS DIRECTORY»,
«Google Scholar» та ін.

Рекомендовано до друку рішенням Вченої ради ЛДУБЖД
(Протокол № 4 від 26.11.2025 р.)

Літературний редактор

Чудеснова І. М.

Комп'ютерна верстка

Ковальчук Ю. В.

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ:

ЛДУБЖД, вул. Клепарівська, 35, м. Львів, 79007

Контактний телефон:

(099) 60 66 532

E-mail:

journal.firesafety@gmail.com

Збірник наукових праць «Пожежна безпека» видається з 2002 року. Запланована періодичність: 2 рази на рік. Тематична спрямованість: оригінальні та оглядові праці в галузі безпеки та оборони за спеціальністю Пожежна безпека.

Здано в набір 19.11.2025. Підписано до друку 23.12.2025.
Формат 60x84⁸. Ум. друк. арк. 14,41. Зам. № 0126/028. Наклад 150 прим.
Гарнітура Times New Roman. Папір офсетний. Цифровий друк.
Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»
65101, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1
Телефон +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 7623 від 22.06.2022 р.

ЗМІСТ

В. М. Баланюк, В. І. Слободян, В. С. Пікус АНАЛІЗ ЗАСОБІВ ПОВЕРХНЕВОГО ВОГНЕЗАХИСТУ ДЛЯ ДЕРЕВИНИ	5
А. І. Березовський, Н. В. Сасенко, Б. Я. Копил, О. М. Григоренко ВПЛИВ ІНТУМЕСЦЕНТНИХ КОМПОНЕНТІВ НА СТРУКТУРНО- МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПІНОКОКСУ ВОГНЕЗАХИСНИХ ПОКРИВІВ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ОСНОВІ АКРИЛОВОЇ ДИСПЕРСІЇ	14
Р. Б. Веселівський, В. Л. Петровський, І. М. Козира ПОЖЕЖНА НЕБЕЗПЕКА ПРОЦЕСІВ ПІДГОТОВКИ СИРОВИНИ ПІДПРИЄМСТВ ТОРФОБРИКЕТНОГО ВИРОБНИЦТВА	26
Д. П. Войтович, Р. Ю. Сукач МОЖЛИВІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ПРОЦЕСІВ УПРАВЛІННЯ ПОЖЕЖНО- РЯТУВАЛЬНИМИ ПІДРОЗДІЛАМИ ПІД ЧАС ГАСІННЯ ПОЖЕЖ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ БПЛА	34
Д. П. Войтович, Р. Ю. Сукач АНАЛІЗ НЕДОЛІКІВ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ	41
І. І. Калужняк, А. Ф. Гаврилюк, Д. В. Фреюк ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БПЛА ДЛЯ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ	52
М. А. Куценко, І. П. Романюк, О. В. Кириченко, О. В. Ніконішин, Є. В. Школяр, Р. Б. Мотрічук, С. О. Хряпак, І. І. Іщенко ПЕРЕВАГИ І НЕДОЛІКИ ПОРОШКОВИХ ЗАСОБІВ ГАСІННЯ ПОЖЕЖІ ТА ШЛЯХИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ЦИХ ЗАСОБІВ	61

CONTENTS

V. M. Balaniuk, V. I. Slobodian, V. S. Pikus ANALYSIS OF SURFACE FIRE- PROTECTION MEANS FOR WOOD	5
A. I. Berezovskyi, N. V. Saienko, B. Ya. Kopyl, O. M. Hryhorenko INFLUENCE OF INTUMESCENT COMPONENTS ON THE STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CHAR LAYER IN FIRE- PROTECTIVE COATINGS FOR STEEL STRUCTURES BASED ON ACRYLIC DISPERSION	14
R. B. Veselivskyi, V. L. Petrovskyi, I. M. Kozyra FIRE HAZARD OF RAW MATERIAL PREPARATION PROCESSES AT PEAT BRICK MANUFACTURING ENTERPRISES	26
D. P. Voytovych, R. Yu. Sukach THE POSSIBILITY OF APPLYING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TO THE MANAGEMENT OF FIRE AND RESCUE UNITS DURING FIREFIGHTING USING UAVS (DRONES)	34
D. P. Voytovych, R. Yu. Sukach ANALYSIS OF SHORTCOMINGS IN THE FIRE PROTECTION OF CRITICAL INFRASTRUCTURE FACILITIES	41
I. I. Kaluzhniak, A. F. Gavryliuk, D. V. Freiuk JUSTIFICATION OF TECHNICAL CHARACTERISTICS OF UAVS FOR FIREFIGHTING	52
M. A. Kutsenko, I. P. Romaniuk, O. V. Kyrychenko, O. V. Nikonishyn, Ie. V. Shkoliar, R. B. Motrichuk, S. O. Khriapak, I. I. Ishchenko ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF POWDER FIRE EXTINGUISHING AGENTS AND WAYS OF IMPROVING THESE AGENTS	61

ЗМІСТ

**О. В. Лазаренко, Я. Б. Великий,
Р. Ю. Сукач, В. В. Коваль**
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА
ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ
СУЧАСНОГО ЗАХИСНОГО ОДЯГУ
РЯТУВАЛЬНИКА В УМОВАХ
ПІДВИЩЕНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ

**В.-П. О. Пархоменко, Ю. Т. Судніцин,
А. М. Домінік, Р. М. Конанець,
Р. В. Пархоменко, Ю. В. Доманський**
АНАЛІЗ ВИРОБНИЦТВА
СКРАПЛЕНОГО ПРИРОДНОГО
ГАЗУ ТА ОСНОВНИХ НЕБЕЗПЕК
ДЛЯ ПОЖЕЖНО-РЯТУВАЛЬНИХ
ПІДРОЗДІЛІВ

О. В. Савченко, В. В. Ніжник
УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ
ОЦІНЮВАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНОГО
ПОЖЕЖНОГО РИЗИКУ
З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ СИСТЕМ
ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ

**Н. В. Саєнко, А. В. Скрипинець,
А. І. Березовський, О. В. Макаренко**
ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДУ
ТА ТОКСИКОЛОГІЧНИХ
ВЛАСТИВОСТЕЙ ПРОДУКТІВ
ГОРІННЯ ЕПОКСИДНИХ
І ЕПОКСИУРЕТАНОВИХ
ВОГНЕЗАХИСНИХ МАТЕРІАЛІВ

**О. В. Хлевной, С. Я. Вовк,
Н. В. Жезло-Хлевна, Д. В. Харишин**
ВПЛИВ ПРИРОДНОЇ ВЕНТИЛЯЦІЇ
НА БЛОКУВАННЯ ЗА ВТРАТИ
ВИДИМОСТІ ЕВАКУАЦІЙНИХ
ВИХОДІВ НА ПОЧАТКОВІЙ СТАДІЇ
РОЗВИТКУ ПОЖЕЖІ

CONTENTS

**O. V. Lazarenko, Ya. B. Velykyi,
R. Yu. Sukach, V. V. Koval**
EXPERIMENTAL ASSESSMENT
OF THE EFFECTIVENESS USING
MODERN PROTECTIVE CLOTHING
OF RESCUERS IN CONDITIONS
OF ELEVATED TEMPERATURE

**V.-P. O. Parkhomenko, Yu. T. Sudnitsyn,
A. M. Dominik, R. M. Konanets,
R. V. Parkhomenko, Yu. V. Domanskyi**
ANALYSIS OF LIQUEFIED
NATURAL GAS PRODUCTION
AND MAJOR HAZARDS
FOR FIRE AND RESCUE
UNITS

O. V. Savchenko, V. V. Nizhnyk
IMPROVEMENT OF THE METHOD
FOR ASSESSING INDIVIDUAL
FIRE RISK CONSIDERING
THE IMPACT OF FIRE PROTECTION
SYSTEMS

**N. V. Saienko, A. V. Skripinets,
A. I. Berezovskyi, O. V. Makarenko**
STUDY OF THE COMPOSITION
AND TOXICOLOGICAL
PROPERTIES OF COMBUSTION
PRODUCTS OF EPOXY
AND EPOXY-URETHANE
FLAME-RETARDANT MATERIALS

**O. V. Khlevnoi, S. Ya. Vovk,
N. V. Zhezlo-Khlevna, D. V. Kharyshyn**
THE IMPACT OF NATURAL
VENTILATION ON THE BLOCKAGE
OF EVACUATION EXITS
DUE TO LOSS OF VISIBILITY
AT THE INITIAL STAGE OF FIRE



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.47.2025.01>

В. М. Баланюк, В. І. Слободян, В. С. Пікус

*Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
м. Львів, Україна*

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8951-6534> – В. М. Баланюк

<http://orcid.org/0009-0007-3163-5956> – В. І. Слободян

<http://orcid.org/0000-0002-8850-9068> – В. С. Пікус



Bagr33@ukr.net

АНАЛІЗ ЗАСОБІВ ПОВЕРХНЕВОГО ВОГНЕЗАХИСТУ ДЛЯ ДЕРЕВИНИ

Вступ. У статті розглянуто актуальну проблему забезпечення належного рівня вогнестійкості деревини за допомогою поверхневих засобів вогнезахисту. Деревина, як природний і відновлюваний будівельний матеріал, має низку переваг – екологічність, легкість оброблення, естетичність, – проте її горючість істотно підвищує рівень її пожежної небезпеки. Саме тому питання підвищення вогнестійкості деревини залишається одним із важливих напрямків сфери пожежної безпеки. У роботі проведено ґрунтовний аналіз вітчизняних і зарубіжних досліджень, присвячених засобам поверхневого вогнезахисту деревини, їх складу, механізму дії, ефективності та експлуатаційним характеристикам.

Метою дослідження є проведення комплексного аналізу існуючих засобів вогнезахисту деревини, визначення найбільш ефективних, а також розроблення теоретичних основ для нового вогнезахисного складу, який би забезпечував глибше просочення деревини, утворення товстішого шару пінококсу при впливі високих температур та мав покращені експлуатаційні властивості. У ході аналізу встановлено, що більшість традиційних покриттів, мають обмежений термін дії та втрачають ефективність під впливом атмосферних факторів. У той же час сучасні інтумесцентні покриття, що утворюють спінений вуглецевий шар при нагріванні, демонструють вищі показники захисту.

Наукова новизна роботи полягає у систематизації сучасних підходів до поверхневого вогнезахисту деревини та формуванні теоретичних передумов для створення нового комбінованого складу покриття, здатного одночасно забезпечити глибше проникнення активних компонентів у структуру деревини та формування стійкого до руйнування шару пінококсу.

Отримані результати дослідження мають практичне значення для подальшого вдосконалення технологій вогнезахисту дерев'яних конструкцій та розроблення нових складів покриттів. Запропоновані напрямки можуть бути використані у виробництві сучасних екологічно безпечних матеріалів, здатних забезпечити тривалий захист деревини без втрати її декоративних і фізико-механічних властивостей.

Ключові слова: вогнезахист, вогнезахисна ефективність, антипірени, інтумесцентні покриття

V. M. Balaniuk, V. I. Slobodian, V. S. Pikus

Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine

ANALYSIS OF SURFACE FIRE-PROTECTION MEANS FOR WOOD

Introduction. The article examines the pressing issue of ensuring adequate fire resistance of wood through surface fire-retardant treatments. Wood, as a natural and renewable construction material, has numerous advantages—environmental friendliness, ease of processing, and aesthetic appeal—but its combustibility significantly increases fire risk. Therefore, enhancing the fire resistance of wood remains a key direction in fire safety research. The study provides a comprehensive analysis of domestic and foreign research on surface fire-protection coatings for wood, focusing on their composition, mechanism of action, efficiency, and operational characteristics.

The aim of the study is to perform an integrated analysis of existing fire-retardant materials, identify the most effective ones, and develop theoretical foundations for a new fire-protective composition that would ensure deeper wood penetration, form a thicker intumescent (char) layer under high temperatures, and exhibit improved

durability. The analysis revealed that most traditional coatings have limited service life and lose efficiency under atmospheric exposure, while modern intumescent coatings show higher protection performance.

The scientific novelty of the work lies in the systematization of modern approaches to surface fire protection of wood and in forming theoretical premises for creating a new combined coating capable of ensuring both deeper penetration of active components and the formation of a stable, heat-resistant char layer.

The obtained results have practical significance for improving fire-protection technologies for wooden structures and developing environmentally safe coatings that provide long-term protection without compromising the decorative or physical-mechanical properties of wood.

Key words: fire protection, fire-retardant efficiency, fire retardants, intumescent coatings.

Постановка проблеми. Проблема підвищення рівня пожежної безпеки будівель в Україні залишається надзвичайно актуальною. За 2024 рік в державі зареєстровано 105214 пожеж (+54,9% відносно 2023 року), унаслідок яких гине 1521 людей [1]. По більшій мірі таке значне зростання пов'язане з активними бойовими діями, проте це не знижує актуальності проблеми підвищення рівня пожежної безпеки об'єктів будівництва. Про високий рівень пожежної небезпеки в Україні свідчать дані офіційної світової пожежної статистики. Якщо в Україні в у 2014 році у розрахунку на 100 пожеж унаслідок пожежі гинуло близько 3,3 осіб, то у США – 0,3, Великобританії – 0,2, Франції та Нідерландах – 0,1 [2].

Деревина як будівельний матеріал знаходить широке застосування завдяки високим фізико-механічним та експлуатаційним властивостям. Однак деревина належить до горючих речовин і в більшості випадків саме вона є найбільш небезпечним матеріалом.

Потреба в вогнезахисних засобах для деревини є критично важливою через зростаючий попит на екологічно чисті будівельні матеріали. Ефективні вогнезахисні обробки повинні бути постійними та не впливати на довговічність чи механічні властивості деревини. Крім того, вони повинні бути нетоксичними та мінімізувати утворення диму. Таким чином, розробка екологічно чистих та безпечних для здоров'я обробок деревини, стійких до вилугування, має значне економічне та соціальне значення [3].

Ефективним способом зниження горючості деревини є обробка її вогнезахисними матеріалами, різновидами якої є поверхневе та глибоке просочування антипіренами. Поверхневе просочування дозволяє перевести деревину до групи важкозаймистих матеріалів, а глибоке просочування – до групи важкогорючих матеріалів. Однак глибоке просочування можна застосувати тільки до нових дерев'яних конструкцій. До того ж ці операції пов'язані з використанням вакууму або надлишкового тиску і потребують складного спеціального обладнання. Технологічний процес триває декілька діб, а вартість вогнезахисної деревини надто висока.

Варто зазначити, що деревина в процесі експлуатації стає більш пожежонебезпечною. У дослідженні [4] було виявлено, що вогневі властивості сильно залежать від щільності та структури волокон деревини. Отже, пухка структура, що утворюється в результаті вивітрювання та старіння, горить швидше, має низький час займання та утворює більше тепла.

У зв'язку з широким застосуванням деревини як будівельного матеріалу проблема підвищення ефективності вогнезахисту деревини є актуальною з точки зору необхідності підвищення рівня пожежної безпеки в Україні.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проведено аналіз останніх українських і закордонних досліджень у сфері поверхневого вогнезахисту деревини. Вітчизняні науковці зосереджують увагу на створенні доступних і екологічно безпечних композиційних покриттів на основі силікатів, фосфатів та мінеральних добавок, які забезпечують підвищену стійкість деревини до дії високих температур. Закордонні дослідження спрямовані на вдосконалення спучувальних покриттів та розроблення нових полімерно-неорганічних систем із кращими захисними властивостями та меншою токсичністю. Сучасні тенденції характеризуються прагненням поєднати ефективність, довговічність і екологічну безпечність вогнезахисних засобів. Згідно з Наказом МВС № 1064 від 26.12.2018 [5] вогнезахисні засоби мають широку класифікацію і залежно від складу та властивостей ВЗ поділяються на: просочувальні вогнезахисні речовини, суміші для просочувальних вогнезахисних речовин, фарби вогнезахисні, лаки вогнезахисні, пасти (обмазки) вогнезахисні, штукатурки вогнезахисні, облицювальні ВЗ.

Залежно від методів захисту ВЗ поділяються на пасивні і реактивні.

До пасивних належать ВЗ, які під час температурного впливу не змінюють своїх розмірів і вогнезахисна ефективність яких забезпечується завдяки їх теплофізичним властивостям (просочувальні та облицювальні ВЗ, штукатурки, пасти (обмазки), вогнезахисні вироби).

До реактивних належать тонкошарові ВЗ (фарби, лаки, пасти (обмазки), що спучуються),

які під час температурного впливу внаслідок хімічних реакцій значно збільшуються у розмірах (спучуються) з утворенням коксового теплоізолявального шару, який захищає об'єкт вогнезахисту від високотемпературного впливу.

Залежно від товщини нанесення ВЗ поділяються на тонкошарові (з товщиною шару до 3 мм включно), товстошарові (з товщиною шару більше 3 мм).

Антипірени – речовини, що ускладнюють займання матеріалів та знижують швидкість поширення полум'я. Антипірени надають матеріалам вогнестійкості, а також припиняють доступ кисню до вкритих ними поверхонь.

Як антипірени найбільш часто використовуються ефіри фосфорних кислот, похідні сурми, хлоровані парафіни, борат цинку, сульфат амонію, бура, борна кислота, рідке скло, переробки фосфоритів з сульфатними згущувачами [6], бромовані аліфатичні ефіри, пропорції силікату натрію та біовугілля [7] та синергічні суміші.

Останнім часом дослідники приділяють значну увагу фосфорвмісним сполукам, оскільки вони відповідають екологічним стандартам для вогнезахисних речовин. Одна з цих речовин, діамоній гідрогенфосфат, фосфорно-азотна сполука, може бути використана для покращення вогнестійкості полімерів. Крім того, діамоній гідрогенфосфат, має малу щільність диму та високу ефективність у вогнестійкості [8].

Карбонат калію також ефективний як антипірен через ряд властивостей. Зокрема, висока вогнезахисна ефективність, висока розчинність у воді, фунгіцидну дію, низьку корозійну активність до заліза та незначний шкідливий вплив на людей і тварин [9].

Антипірени повинні відповідати низці вимог, що забезпечують ефективний і безпечний вогнезахист деревини. Вони мають перешкоджати горінню та тлінню захищаного матеріалу, не викликати корозії металевих частин конструкцій і зберігати довготривалість своєї дії. Крім того, антипірени не повинні підвищувати гігроскопічність деревини, бути токсичними для людей і тварин або впливати на лакофарбові покриття, нанесені на оброблені поверхні. Важливо також, щоб вони забезпечували біостійкість просоченого матеріалу – самостійно або у поєднанні з антисептиками, не створювали труднощів під час механічної обробки та не погіршували фізико-механічних властивостей деревини.

Просочувальні вогнезахисні засоби є одним із найпоширеніших методів зниження горючості деревини. Їхня дія ґрунтується на глибокому проникненні в структуру матеріалу спеціальних

антипіренів – речовин, які при нагріванні утворюють негорючі продукти, що перешкоджають термічному розкладанню та поширенню полум'я. Таке оброблення не змінює фізико-механічних властивостей основи, зберігає її природний вигляд і не потребує складного технологічного обладнання, що робить метод зручним у застосуванні. Завдяки поєднанню методів вогнезахисту, вогнестійкість та біоохист деревини можна збільшити в кілька разів [10].

Ефективність вогнезахисту залежить від багатьох факторів, зокрема: хімічного складу вогнезахисного засобу, способу його нанесення, здатності засобу до ефективного проникнення в деревину, вологості деревини, розподілу засобу по деревині та глибини просочування, а також від перевірки відповідності вогнезахисту та часу експлуатації вогнезахисту [11].

Вернер та ін. [12] досліджували ефективність просочування деревини деякими аніпіренами. Дослідження показало, що вогнезахисну ефективність деревини при дворазовому нанесенні розчину забезпечує лише покриття деревини меламінполіфосфатом. Обробка деревини водними розчинами борної кислоти, гідроксиду алюмінію та меламінполіфосфату (магнійфосфату) вимагає багаторазового покриття цими вогнезахисними речовинами.

Розробляються вогнезахисні просочувальні речовини на основі біоохисних засобів, що робить їх універсальними та доцільними. Наприклад, Сіврікая та ін. [13] досліджували ефективність обробки сосни сумішшю сорбітол-лимонної кислоти та антипіренів діамоній гідрофосфату та карбонат калію, пропорцією 1:2. Така суміш підвищує термічну стабільність, що призводить до вищої залишкової маси порівняно з тільки сорбітол-лимонною кислотою та необробленою сосною.

Постановка задачі та її розв'язання: проведення аналізу існуючих засобів поверхневого вогнезахисту деревини, визначення їх ефективності та недоліків, а також розроблення теоретичного підґрунтя для нового складу покриття, з більш ефективними характеристиками проникнення та поверхневого захисту.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих результатів. Таким чином вагомим недоліком просочувальних вогнезахисних речовин є відносно недовгий строк придатності вогнезахисного просочування. Строк придатності вогнезахисного просочування. В умовах високої конкуренції вогнезахисних засобів суб'єкти господарювання все частіше здійснюють заміну вогнезахисного

засобу при повторних роботах з вогнезахисту, що призводить до виникнення антагонізму їх властивостей [14].

Корнієнко та ін. [15] досліджували строки придатності вогнезахисних просочень для деревини. Об'єктом досліджень у даній роботі були вогнезахисні речовини «БС-13», «АЛАНА», «ECOSEPT 450-1», «Неомид 450-1», предметом дослідження – вплив терміну зберігання в неопалювальних приміщеннях зразків деревини, виготовлених і оброблених згідно з вимогами нормативних документів, на змінення ефективності

їхнього вогнезахисту. Результати досліджень наведені у таблиці 1. Нижче наведено аналіз просочувальних рецептур та вказано їх основні характеристики які впливають на їх вогнезахисну ефективність.

З результатів дослідження можна зробити висновок, що поширені просочувальні вогнезахисні засоби забезпечують початкове значення вогнезахисної групи протягом одного року, що передбачено їхнім регламентом. З кожним наступним роком зберігання середнє значення втрати маси зразків зростає на декілька відсотків. Найменше

Таблиця 1

Результати випробувань з визначення групи вогнезахисної ефективності досліджених вогнезахисних речовин залежно від терміну зберігання [15, 16]

Назва вогнезахисної речовини для дерев'яних елементів горючих покриттів	Спосіб вогнезахисного оброблення	Середня витрата вогнезахисного засобу	Група вогнезахисної ефективності вогнезахисного засобу (середнє значення втрати маси зразків, %)		Примітка (про зміни якості вогнезахисту)
			на момент закладання	Через 1 рік зберігання	
Просочувальні вогнезахисні речовини					
Просочувальна вогнезахисна речовина «БС-13»	Глибоке вогнезахисне просочення	494,1 кг/м³ (в перерахунку на суху речовину – 74,1 кг/м³)	I (7,4)	I (7,6)	Забезпечується початкове значення групи вогнезахисної ефективності протягом одного року
Просочувальна вогнебіозахисна речовина «АЛАНА»	Поверхнєве вогнезахисне просочення (пензлем за два рази)	249,6 г/м² (в перерахунку на суху речовину – 174,7 г/м²)	I (6,6)	I (6,8)	
Просочувальна вогнебіозахисна речовина «ECOSEPT 450-1»	Поверхнєве вогнезахисне просочення (пензлем за два рази)	300,1 г/м² (в перерахунку на суху речовину – 193,1 г/м²)	I (7,1)	I (7,2)	
Просочувальна вогнезахисна речовина «Неомид 450-1»	Поверхнєве вогнезахисне просочення (пензлем за два рази)	249,7 г/м² (в перерахунку на суху речовину – 187,2 г/м²)	I (2,8)	I (5,7)	
Просочувальна вогнезахисна речовина «Бар'єр-1»	Глибоке вогнезахисне просочення (гаряча-холодна ванна) I група	759,5 кг/м³ (в перерахунку на суху речовину – 151,9 кг/м³)	I (7,2)	I (8,1)	
Просочувальна вогнезахисна речовина «Тутан Professional 4F Вогнебіозахист»	Глибоке вогнезахисне просочення (гаряча-холодна ванна) I група	184,4 кг/м³ (в перерахунку на суху речовину – 46,1 кг/м³)	I (7,3)	I (8,0)	
Вогнезахисна просочувальна речовина (антипірен) NLA-8	Глибоке вогнезахисне просочення (автоклавне просочення) I група	647 кг/м³ (в перерахунку на суху речовину – 80,9 кг/м³)	I (8,1)	I (8,3)	

зростання спостерігається у «ECOSEPT 450-1» (+1,41% від початкового значення) та «АЛАН» (+3,03% від початкового значення). Найменшу ефективність збереження терміну придатності показує «Неомид 450-1» (+103,57% від початкового значення). Спостерігаючи таку динаміку, можна зробити висновок, що через декілька років зберігання ці засоби не зможуть забезпечувати початкову групу вогнезахисту.

Парадоксально, проте найефективніші і найменш ефективніші засоби були нанесені за допомогою пензля. З цього можна зробити висновок, що збереження терміну придатності більше залежить від складу речовини, а не від способу нанесення. Однак, у випадку з БС-13 спосіб нанесення має важливе значення. При глибокому вогнезахисному просоченні цей засіб надає І групу вогнезахисту, який зберігається протягом 1 року експлуатації. Однак, при поверхневому нанесенні БС-13 забезпечує II групу вогнезахисту, а після 1 року зберігання взагалі не забезпечує вогнезахист деревини [16].

Просочувальні вогнезахисні засоби є одними з найпоширеніших засобів. Основними перевагами просочення є простота застосування, збереження зовнішнього вигляду деревини, невисока вартість обробки та можливість використання для різних типів конструкцій. Також важливим позитивним аспектом цього методу вогнезахисту є певний рівень біозахисту [17], що є суттєвим при обробці деревини.

Водночас такі засоби мають і певні недоліки. Глибина та тривалість дії просочення залежать від вологості деревини, умов експлуатації та способу нанесення. При впливі атмосферних опадів, сонячного випромінювання чи механічного стирання захисні властивості поступово знижуються, що потребує періодичного оновлення обробки. Згідно подальшого порівняння, фарби та лаки частково позбавлені таких недоліків і мають дещо довший термін вогнезахисної придатності. Вогнезахисні фарби та лаки є ефективними засобами зниження горючості будівельних матеріалів, зокрема деревини та металевих конструкцій. Вони утворюють на поверхні тонкий шар, який під дією високої температури спінюється або утворює теплоізоляційну плівку, що уповільнює нагрівання та займання основи. Такі покриття поєднують декоративну та захисну функції, відповідають вимогам чинних нормативних документів і застосовуються для підвищення рівня пожежної безпеки будівельних об'єктів [18].

Вогнезахисні фарби та лаки повинні відповідати ряду вимог, що забезпечують їх ефективність і безпечність під час експлуатації. Насамперед

вони мають бути нетоксичними, тобто безпечними для використання у житлових приміщеннях і не виділяти шкідливих речовин під час нагрівання. Важливою характеристикою є гнучкість покриття, яка дає змогу деревині вільно розширюватися та стискатися без утворення тріщин, зберігаючи цілісність і міцність захисного шару. Крім того, такі матеріали повинні вирізнятися простотою нанесення – забезпечувати рівномірне покриття на різних типах дерев'яних поверхонь, створюючи надійний бар'єр проти вогню [19].

Вогнезахисні лаки – речовини, що утворюють на поверхні матеріалу, який захищається, тонку прозору плівку. Ця плівка дозволяє зберегти текстуру деревини й володіє декоративними властивостями, а також захищає деревину від загоряння.

Вогнезахисні фарби – речовини, що наносять на поверхню матеріалу, який захищається, з метою утворення на ньому непрозорого шару різних кольорів і відтінків, для надання декоративного виду, попередження загоряння, поширення полум'я по поверхні та захисту від впливу вологи [20]. Цей метод вогнезахисту характеризується тривалішим терміном експлуатації порівняно з просоченнями. Однак наявність у складі органічних розчинників обмежує його використання в житлових і громадських будівлях. Вогнезахисні фарби являють собою суспензію пігментів, наповнювачів та допоміжних компонентів і призначені переважно для оброблення конструкцій усередині приміщень [20].

Згідно класифікації вогнезахисні фарби та лаки поділяються на пасивні та реактивні. Пасивні фарби не змінюють свого об'єму при збільшенні температури, що робить їх не такими ефективними в порівнянні з реактивними. Застосування фарб, що не спучуються, уповільнює загоряння деревини лише на 3 – 5 хв. В основному цю фарбу застосовують для захисту деревно-полімерних композитів [20].

При нагріванні покриття, що спучуються, розкладаються, виділяючи пари або газу, що блокують конвективний перенос тепла до поверхні, подавляють полум'я. А пористий шар обвугленого покриття служить теплоізолятором [21]. Вогнезахисні фарби та лаки посідають важливе місце серед сучасних засобів підвищення пожежної безпеки будівельних конструкцій. Вогнезахисні фарби є найпоширенішим способом вогнезахисту деревини через ряд переваг, а саме відносно висока вогнезахисна ефективність і простота у використанні. Варто зазначити, що фарби та лаки мають ще 2 додаткові функції – біологічний захист декоративність.

Особливо доцільними є інтумесцентні фарби, ефективність яких зумовлена здатністю утворювати на поверхні конструкцій захисний теплоізоляційний шар, який при дії високої температури перешкоджає доступу кисню, знижує теплопровідність та уповільнює процеси займання і поширення полум'я [22]. Завдяки цьому такі матеріали істотно підвищують межу вогнестійкості деревини, металу та інших основ, що особливо важливо для внутрішніх елементів будівель.

Оцінку ефективності деяких фарб і лаків провів Гайдук [23] та ін., результати яких наведено в таблиці 2.

У порівняльному аналізі слід звернути увагу на строк вогнезахисного терміну, адже це основна перевага фарб та лаків над просоченнями. Бачимо, що найдовші терміни (25-30 років) у фарб №3, 4 та 6. Проте слід звернути увагу, що виробник цих засобів не надає протоколів підтвердження терміну. Тому не можна обґрунтовано підтвердити такий довгий час вогнезахисної ефективності. До уваги треба брати ті зразки, які мають протоколи підтвердження заявленого терміну вогнезахисту. У цьому випадку середній термін становить більш реальні 10 років, що переважно довше за строк вогнезахисної придатності просочувальних речовин.

Для виконання вогнезахисного облицювання використовують гіпсокартон, магнезитові та цементно-стружкові плити, азбестоцемент, базальтові мати, склотканини й інші термостійкі матеріали. Ефективність екранування залежить від товщини й теплопровідності облицювального шару, способу кріплення та герметичності стиків. Завдяки простоті монтажу, довговічності та

відсутності потреби у спеціальному обладнанні, метод екранування широко застосовується в будівництві для захисту як дерев'яних, так і металевих конструкцій [25].

До конструктивного вогнезахисту відносяться штукатурки, облицювання плитними, рулонними та іншими вогнезахисними матеріалами, у тому числі на каркасі, з повітряними прошарками, а також комбінація даних матеріалів, у тому числі з тонкошаровими покриттями, що спучуються. Широкого застосування набули гіпсокартонні листи, магнезитові, гіпсоволокнисті та вермикулитові плити, композитні панелі, плити з базальтовими волокнами тощо [26].

Широкого застосування в облицюванні набув гіпсокартон через ряд різноманітних властивостей. Щодо вогнезахисної, то стратегія пожежної безпеки для Dalston Works визначає, що гіпсокартон забезпечує 49 хвилин вогнезахисту, після чого деревина обвуглюється зі швидкістю 0,7 мм за хвилину [27].

Конструктивний вогнезахист ефективний та суттєво підвищує межу вогнестійкості будівельних конструкцій. Шаршанов та Абрамов [28] у своїх дослідженнях вказують такий результат:

- вогнезахисні штукатурки (до 180 і більше хвилин);
- облицювальні вогнестійкі плити (до 180 і більше хвилин);
- вогнезахисні сполуки (фарби), що спучуються (до 90 хв)

Вогнезахисне облицювання (екранування) є одним із найнадійніших та довговічних способів підвищення вогнестійкості будівельних конструкцій. Воно забезпечує ефективну теплоізоляцію

Таблиця 2

Характеристики сучасних вогнезахисних засобів для деревини, що застосовувались в Україні в період з 2019 року до 01.07.2023 року [23, 24]

№ з/п	Назва вогнезахисного засобу	Стан вогнезахисного засобу	Товщина вогнезахисного просочення (оброблення), (мм)	Заявлений термін вогнезахисту, років	Наявність протоколів підтвердження терміну вогнезахисту
1	Фенікс ДБ	Фарба	0,25	30	Не вказано
2	Antifire Paint Plus	Лак	0,15	7	В наявності
3	Фаєрвол-Вуд	Фарба	0,2	10	В наявності
4	Defens W	Фарба	0,2	30	Не вказано
5	ВД АК 5021 «Пірант Колор»	Фарба	0,2	10	Не вказано
6	Defender	Фарба	Не вказано	25	Не вказано
7	ЕНДОТЕРМ ХТ-150	Фарба	0,2	12	Не вказано
8	Ендотерм 250103	Фарба	0,12	10	В наявності
9	Fireproof coating	Фарба	0,1	10	В наявності

матеріалу від дії відкритого полум'я, що значно знижує ризик його займання та деформації. Застосування негорючих плитних або волокнистих матеріалів дозволяє зберігати несучу здатність конструкцій упродовж тривалого часу пожежі.

Разом із тим, ефективність методу залежить від правильності монтажу, вибору матеріалів та забезпечення цілісності захисного шару. Також вагомим недоліком є можливість піролізу та тління під вогнезахисним екраном внаслідок тривалого нагрівання деревини, яке знаходиться під ним.

Висновок. Перспективи подальших досліджень полягають у розробленні нових композиційних вогнезахисних засобів із покращеними адгезійними, термостійкими та гідрофобними властивостями, які забезпечуватимуть глибше проникнення активних речовин у структуру деревини та формування більш стабільного шару пінококсу. Особливу увагу слід приділити оптимізації складу інтумесцентних систем, підбору ефективних каталізаторів і стабілізаторів спучування, а також вивченню взаємодії покриттів із різними породами деревини з урахуванням їх фізико-хімічних характеристик.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Аналітична довідка про пожежі та їх наслідки в Україні. URL: <https://dsns.gov.ua/upload/2/2/8/5/6/0/7/analichna-dovidka-pro-pojeji-112024.pdf>.
2. Ключко А. М., Борисова Л. В., Никітіна Л. О. Щодо статистичних даних у сфері пожежної безпеки. *Bulletin of the National University of Civil Protection of Ukraine. Series: Public Administration*. 2022. Issue 2(17)2022. URL: <https://doi.org/10.5236/3/2414-5866-2022-2-33>.
3. Sauerbier P., Mayer A.K., Emmerich L., Militz H. Fire retardant treatment of wood—state of the art and future perspectives. In *Wood & Fire Safety: Proceedings of the 9th International Conference on Wood & Fire Safety* 9: 97–102. Springer International Publishing. 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41235-7_14.
4. Jing C., Renner, J.S., Xu, Q. Research on the Fire Performance of Aged and Modern Wood. In: Makovická Osvaldová, L., Hasburgh, L.E., Das, O. (eds). 2024. *Wood & Fire Safety* 2024.
5. Про затвердження Правил з вогнезахисту. Офіційний вебпортал парламенту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0259-19#Text>.
6. Begimkulov J., Abdurakhmanov E., Abdurakhmanov G., Murodova Z.B., Baratova M.R. Production of Fire-Resistant Compounds for Protecting Wood Products from Fire Based on Central Kyzilkum Phosphorites. In: Silhavy, R., Silhavy, P. (eds) *Software Engineering: Emerging Trends and Practices in System Development*. CSOC 2025. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1558. 2026.
7. Rantuch P., Kvorková V., Martinka J., Štefko T., Wachter I. Fire Protection of Wood Using a Coating Based on Sodium Silicate and Biochar. In: Makovická Osvaldová, L., Hasburgh, L.E., Das, O. (eds) *Wood & Fire Safety* 2024.
8. Liu C, Wei L, Ma B, Zhang Y, Jia X. Effect of diammonium hydrogen phosphate coated with silica on flame retardancy of epoxy resin. *RSC Adv*. 2024. 14(39):28965–28975. <https://doi.org/10.1039/D4RA05513F>.
9. Grzeskowiak W. Evaluation of the effectiveness of the fire retardant mixture containing potassium carbonate using a cone calorimeter. *Fire Mater* 36(1):75–83. <https://doi.org/10.1002/fam.1088>.
10. Popescu C. M., Pfriem A. Treatments and modification to improve the reaction to fire of wood and wood-based products—An overview. *Fire Mater*. 2012. 44(1):100–111. <https://doi.org/10.1002/fam.2779>.
11. Marino S., Gaff M., Sethy A.K., et al.: Enhancing the fire resistance properties of thermally modified *Robinia pseudoacacia* wood with natural and synthetic flame retardants: chemical characterisation and fire behaviour. *Eur. J. Wood Prod*. 82, 2024. 1145–1157.
12. Islam MN, Ando K, Hattori N, Yamauchi H, Kobayashi Y. Comparative study between full cell and passive impregnation method of wood preservation for laser incised Douglas fir lumber. *Wood Sci Technol*. 2008. № 42. P. 343–350.
13. Li X., Li C., Wang L. et al. Synergistic flame retardant mechanism of PA66 with aluminum dicyclohexyl hypophosphonate and melamine polyphosphate. *J Therm Anal Calorim* 150, 5099–5108. 2025. <https://doi.org/10.1007/s10973-025-14107-w>.
14. Sivrikaya H., Wu M., Militz H. Fire resistance of Scots pine modified with sorbitol, citric acid and fire retardants. *Eur. J. Wood Prod*. 83, 127, 2025. <https://doi.org/10.1007/s00107-025-02282-4>.
15. Гаврилюк А. Ф., Гайдук М. О. Дослідження антагонізму вогнезахисного просочування дерев'яних будівельних конструкцій, як спосіб покращення пожежної безпеки в умовах війни. *Цивільний захист в умовах війни*. 2023. С. 121.
16. Корнієнко О. В. Проміжні результати досліджень з визначення строку придатності вогнезахисних покривів (просочень) для деревини. *Проблеми техніко-екологічної безпеки: освіта, наука, практика*. 2016. С. 57.
17. О. Д. Гудович, О. В. Корнієнко. Дослідження зміни ефективності вогнезахисту деревини залежно від часу та умов зберігання. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну* 2012. № 5 (67). С. 50–55.
18. Van Acker, J., Durimel, M., De Ligne, L., Parakhonskiy, B., Skirtach, A.G., Vanden Bulcke, J. Wood Modification Methods and Fire Resistance of Façades and Cladding. In: Goli, G., et al. *Proceedings of the 11th European Conference on Wood Modification*. 2025.
19. Демідов Д. В. Вивчення впливу мінеральних наповнювачів на вогнезахисні характеристики водно-дисперсійних лакофарбових покриттів. *Збір-*

ник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2018. Т. 182. С. 37–43.

20. Вибір вогнезахисних фарб: аналіз матеріалів для різних будівель. Аналіз матеріалів для вогнезахисних фарб: який вибір підходить для різних будівель | МЕРКОР. URL: <https://mercor.com.ua/analiz-materialiv-dlya-vognezahysnyh-farb-yakyj-vybir-pidhodyt-dlya-riznyh-budivel/>.

21. Пазен О., Пранничук О. Сучасні методи та засоби вогнезахисту деревини. Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності : Матеріали міжнар. конф., м. Львів. 2022. С. 23–26.

22. Баланюк В. М. The effectiveness of open space fire extinguishing with flammable liquid fighting aerosols. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(10(77)), 2015. 4–11. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.51399>.

23. Баланюк В.М., Грималюк Б.Т., Кіт Ю.В., Левуш С.С. Вплив газової фази на ефективність вогнегасних аерозолів. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». 2004. Т. 5. С. 102–104.

24. Haiduk M., Havryliuk A., Yakovchuk R. Problematic aspects of determining fire protection of wood. *Municipal economy of cities*. 2024. Vol. 1, no. 182. P. 187–194. URL: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-1-182-187-194>.

25. Вогнебіозахист для дерева/деревини – вогнезахисна обробка дерев'яних конструкцій. Обробка дерева – купити антисептичні засоби захисту деревини від вологи/гниття/вогню в Києві. URL: <https://bionic-house.com.ua/ua/katalog-produktsiji/vognebiozakhist-derevini-ta-antipireni.html>.

26. Данілін О., Кульченко Є. Захист будівель від впливу небезпечних чинників. Науково – практичні аспекти управління у сфері цивільного захисту : матеріали міжнар. конф., м. Харків. 2023. С.44–45.

27. Zehfuß J., Sander L. Gypsum plasterboards under natural fire – Experimental investigations of thermal properties. *Civil Engineering Design*, 3(3), 2021. 62–72.

28. Pearson A. Dalston Lane: Tall Timber. 2016. URL: <https://www.building.co.uk/technical-case-studies/dalston-lane-tall-timber/5079749.article>.

29. Захист речовин і матеріалів від теплового впливу пожежі за допомогою екранів і покриттів / А.Я. Шаршанов, Ю.О. Абрамов. Харків: НУЦЗУ, 2023. 280 с.

REFERENCES

1. Analıtychna dovidka pro pozhezhi ta yikh naslidky v Ukraini [Analytical Report on Fires and Their Consequences in Ukraine]. (n.d.). Retrieved from: <https://dsns.gov.ua/upload/2/2/8/5/6/0/7/analıtychna-dovidka-pro-pojejji-112024.pdf> [in Ukrainian].

2. Klochko, A. M., Borysova, L. V., & Nikitina, L. O. (2022). Shchodo statystychnykh danykh u sferi pozhezhoi bezpeky [On Statistical Data in the Field of Fire Safety]. *Bulletin of the National University of Civil Protection of Ukraine. Series:*

Public Administration – Bulletin of the National University of Civil Protection of Ukraine. Series: Public Administration, 2(17). <https://doi.org/10.52363/2414-5866-2022-2-33> [in Ukrainian].

3. Sauerbier, P., Mayer, A. K., Emmerich, L., & Militz, H. (2020). Fire retardant treatment of wood – state of the art and future perspectives. In *Wood & Fire Safety: Proceedings of the 9th International Conference on Wood & Fire Safety* (pp. 97–102). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41235-7_14

4. Jing, C., Renner, J. S., & Xu, Q. (2024). Research on the Fire Performance of Aged and Modern Wood. In *Makovická Osvaldová, L., Hasburgh, L. E., & Das, O. (Eds.), Wood & Fire Safety 2024*.

5. Pro zatverdzhennia Pravyl z vohnezakhystu [On the Approval of Fire Protection Rules]. (n.d.). Ofitsiyniy vebportal parlamentu Ukrainy – Official Web Portal of the Parliament of Ukraine. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0259-19> [in Ukrainian].

6. Begimkulov, J., Abdurakhmanov, E., Abdurakhmanov, G., Murodova, Z. B., & Baratova, M. R. (2026). Production of Fire-Resistant Compounds for Protecting Wood Products from Fire Based on Central Kyzylkum Phosphorites. In R. Silhavy & P. Silhavy (Eds.), *Software Engineering: Emerging Trends and Practices in System Development* (Vol. 1558).

7. Rantuch, P., Kvorková, V., Martinka, J., Štefko, T., & Wachter, I. (2024). Fire protection of wood using a coating based on sodium silicate and biochar. In *Makovická Osvaldová, L., Hasburgh, L. E., & Das, O. (Eds.), Wood & Fire Safety 2024*.

8. Liu, C., Wei, L., Ma, B., Zhang, Y., & Jia, X. (2024). Effect of diammonium hydrogen phosphate coated with silica on flame retardancy of epoxy resin. *RSC Advances*, 14(39), 28965–28975. <https://doi.org/10.1039/D4RA05513F>

9. Grzeskowiak, W. (2012). Evaluation of the effectiveness of the fire retardant mixture containing potassium carbonate using a cone calorimeter. *Fire and Materials*, 36(1), 75–83. <https://doi.org/10.1002/fam.1088>

10. Popescu, C. M., & Pfriem, A. (2012). Treatments and modification to improve the reaction to fire of wood and wood-based products – An overview. *Fire and Materials*, 44(1), 100–111. <https://doi.org/10.1002/fam.2779>

11. Marino, S., Gaff, M., & Sethy, A. K., et al. (2024). Enhancing the fire resistance properties of thermally modified Robinia pseudoacacia wood with natural and synthetic flame retardants: Chemical characterisation and fire behaviour. *European Journal of Wood and Wood Products*, 82, 1145–1157.

12. Islam, M. N., Ando, K., Hattori, N., Yamauchi, H., & Kobayashi, Y. (2008). Comparative study between full cell and passive impregnation methods of wood preservation for laser incised Douglas fir lumber. *Wood Science and Technology*, 42, 343–350.

13. Li, X., Li, C., Wang, L., et al. (2025). Synergistic flame retardant mechanism of PA66 with aluminum dicyclohexyl hypophosphonate and melamine

polyphosphate. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 150, 5099–5108. <https://doi.org/10.1007/s10973-025-14107-w>

14. Sivrikaya, H., Wu, M., & Militz, H. (2025). Fire resistance of Scots pine modified with sorbitol, citric acid and fire retardants. *European Journal of Wood and Wood Products*, 83, 127. <https://doi.org/10.1007/s00107-025-02282-4> [in Ukrainian].

15. Havryliuk, A. F., & Haiduk, M. O. (2023). Doslidzhennia antahonizmu vohnezakhysnoho prosochuvannia derevianykh budivelnnykh konstrukttsii yak sposib pokrashchennia pozhezhnoi bezpeky v umovakh viiny [Study of the Antagonism of Fire-Protective Impregnation of Wooden Building Structures as a Way to Improve Fire Safety in Wartime]. *Tsyvilnyi zakhyst v umovakh viiny – Civil Protection in Wartime*, 121. [in Ukrainian].

16. Korniienko, O. V. (2016). Promizhni rezultaty doslidzhen z vyznachennia stroku prydatnosti vohnezakhysnykh pokryviv (prosochen) dlia derevyny [Intermediate Results of Research on Determining the Service Life of Fire-Protective Coatings (Impregnations) for Wood]. *Problemy tekhniko-ekolohichnoi bezpeky: osvita, nauka, praktyka – Problems of Technical and Environmental Safety: Education, Science, Practice*, 57.

17. Hudovych, O. D., & Korniienko, O. V. (2012). Doslidzhennia zminy efektyvnosti vohnezakhystu derevyny zalezno vid chasu ta umov zberihannia [Study of Changes in Fire Protection Efficiency of Wood Depending on Time and Storage Conditions]. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu – Bulletin of Kyiv National University of Technologies and Design*, 5(67), 50–55. [in Ukrainian].

18. Van Acker, J., Durimel, M., De Ligne, L., Parakhonskiy, B., Skirtach, A. G., & Van den Bulcke, J. (2025). Wood Modification Methods and Fire Resistance of Façades and Cladding. In Goli, G., et al. (Eds.), *Proceedings of the 11th European Conference on Wood Modification*.

19. Demidov, D. V. (2018). Vyvchennia vplyvu mineralnykh napovnyuvachiv na vohnezakhysni kharakterystyky vodno-dispersynykh lakofarbovykh pokryttiv [Study of the Influence of Mineral Fillers on Fire-Protective Characteristics of Water-Dispersion Paint-and-Lacquer Coatings]. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainiskoho derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Collection of Scientific Works of the Ukrainian State University of Railway Transport*, 182, 37–43. [in Ukrainian].

20. Vymir vohnezakhysnykh farb: analiz materialiv dlia riznykh budivel [Selection of Fire-Protective Paints: Analysis of Materials for Different Types of Buildings]. (n.d.). MERKOR. Retrieved from: <https://mercor.com.ua/analiz-materialiv-dlya-vognezhahysnyh-farb-yakyy-vybir-pidhodyt-dlya-riznyh-budivel/> [in Ukrainian].

21. Pazen, O., & Prannychuk, O. (2022). Suchasni metody ta zasoby vohnezakhystu derevyny [Modern Methods and Means of Wood Fire Protection]. In *Problemy ta perspektyvy rozvytku systemy bezpeky zhyttiedialnosti – Problems and Prospects of Development of the Life Safety System* (pp. 23–26). [in Ukrainian].

22. Balaniuk, V. M. (2015). The effectiveness of open space fire extinguishing with flammable liquid fighting aerosols. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(10), 4–11. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.51399> [in Ukrainian].

23. Balaniuk, V. M., Hrymaluk, B. T., Kit, Yu. V., & Levush, S. S. (2004). Vplyv hazovoi fazy na efektyvnist vohnehasnykh aeroliziv [Influence of Gas Phase on the Efficiency of Fire-Extinguishing Aerosols]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu “Lvivska politehnika” – Bulletin of Lviv Polytechnic National University*, 5, 102–104. [in Ukrainian].

24. Haiduk, M., Havryliuk, A., & Yakovchuk, R. (2024). Problematic aspects of determining fire protection of wood. *Municipal Economy of Cities*, 1(182), 187–194. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-1-182-187-194>.

25. Vohnebiozakhyst dlia dereva/derevyny – vohnezakhysna obrobka derevianykh konstrukttsii [Fire-Bio Protection for Wood – Fire-Protective Treatment of Wooden Structures]. (n.d.). Bionic House. Retrieved from: <https://bionic-house.com.ua/ua/katalog-produktsiji/vognebiozakhyst-derevini-ta-antypireni.html> [in Ukrainian].

26. Danilin, O., & Kulchenko, Ye. (2023). Zakhyst budivel vid vplyvu nebezpechnykh chynnykiv [Protection of Buildings Against Hazardous Factors]. In *Naukovo-praktychni aspekty upravlinnia u sferi tsyvilnoho zakhystu – Scientific and Practical Aspects of Management in the Field of Civil Protection* (pp. 44–45). [in Ukrainian].

27. Zehfuß, J., & Sander, L. (2021). Gypsum plasterboards under natural fire: Experimental investigations of thermal properties. *Civil Engineering Design*, 3(3), 62–72.

28. Pearson, A. (2016). Dalston Lane: Tall Timber. <https://www.building.co.uk/technical-case-studies/dalston-lane-tall-timber/5079749.article>.

29. Sharshanov, A. Ya., & Abramov, Yu. O. (2023). Zakhyst rehovyn i materialiv vid teplovoho vplyvu pozhezhi za dopomohoiu ekraniv i pokryttiv [Protection of Substances and Materials Against Thermal Fire Exposure Using Screens and Coatings]. *Kharkiv: NUTSU*.

© В. М. Баланюк, В. І. Слободян, В. С. Пикус

Оглядова стаття.

Стаття надійшла до редакції 20.09.2025

Стаття прийнята 02.10.2025

Статтю опубліковано 23.12.2025



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.47.2025.02>

А. І. Березовський, Н. В. Саєнко, Б. Я. Копил, О. М. Григоренко
Національний університет цивільного захисту України,
м. Черкаси, Україна

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4043-1206> – А. І. Березовський
<http://orcid.org/0000-0003-4873-5316> – Н. В. Саєнко
<http://orcid.org/0000-0002-2995-3927> – Б. Я. Копил
<http://orcid.org/0000-0003-4629-1010> – О. М. Григоренко
✉ saienko_natalia@nuczu.edu.ua

ВПЛИВ ІНТУМЕСЦЕНТНИХ КОМПОНЕНТІВ НА СТРУКТУРНО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПІНОКОКСУ ВОГНЕЗАХИСНИХ ПОКРИВІВ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ОСНОВІ АКРИЛОВОЇ ДИСПЕРСІЇ

Мета. Одним із найактуальніших завдань сучасної пожежної безпеки є підвищення ефективності інтумесцентних вогнезахисних покривів для металевих конструкцій. Проте більшість відомих систем характеризуються високим коефіцієнтом спучення за недостатньої механічної міцності сформованого пінококсу, що знижує їхню стабільність під дією полум'я та потоків гарячих газів.

Встановити вплив співвідношення основних інтумесцентних компонентів – поліфосфату амонію (ПФА), пентаеритриту (ПЕ) та гідроксиду алюмінію ($\text{Al}(\text{OH})_3$) – на коефіцієнт спучення, механічну міцність і термостійкість пінококсу з метою оптимізації складу покривів для підвищення вогнезахисної ефективності.

Експериментальні дослідження проведено з використанням термогравіметричного аналізу (ТГА), статичного навантаження щільними вантажами та визначення лінійного та об'ємного коефіцієнта спучення.

Встановлено, що збільшення вмісту ПЕ сприяє зростанню ступеня спучення, проте знижує міцність пінококсу через надмірну пористість. Оптимальний склад покриття визначено як: ПФА – 25 мас.%, ПЕ – 15 мас.%, $\text{Al}(\text{OH})_3$ – 40 мас.%, що забезпечує найкращий баланс між спученням і міцністю.

Висновки та пропозиції. Встановлено, що ефективність інтумесцентних систем визначається не лише коефіцієнтом спучення, а й структурною цілісністю пінококсу. Запропоноване співвідношення компонентів може бути рекомендоване для створення вогнезахисних покривів на водній основі з підвищеною вогнестійкістю металевих конструкцій.

Ключові слова: інтумесцентні компоненти, коефіцієнт спучення, термостійкість, міцність пінококсу.

А. І. Berezovskyi, N. V. Saienko, B. Ya. Kopyl, O. M. Hryhorenko
National University of Civil Protection of Ukraine,
Cherkasy, Ukraine

INFLUENCE OF INTUMESCENT COMPONENTS ON THE STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CHAR LAYER IN FIRE-PROTECTIVE COATINGS FOR STEEL STRUCTURES BASED ON ACRYLIC DISPERSION

Introduction. One of the most urgent tasks in modern fire safety is to improve the efficiency of intumescent fire-protective coatings for steel structures. However, most existing systems are characterized by a high expansion ratio combined with insufficient mechanical strength of the formed char layer, which reduces their stability under the action of flame and hot gas flows.

To determine the influence of the ratio of the main intumescent components – ammonium polyphosphate (APP), pentaerythritol (PE), and aluminum hydroxide ($\text{Al}(\text{OH})_3$) – on the expansion coefficient, mechanical strength, and thermal stability of the char layer, in order to optimize coating formulations for enhanced fire-protective performance.

Experimental studies were carried out using thermogravimetric analysis (TGA), static loading with slotted weights, and determination of linear and volumetric expansion coefficients.

It was found that increasing the PE content promotes a higher degree of expansion but reduces the mechanical strength of the char due to excessive porosity. The optimal coating composition was determined as: APP – 25 wt.%, PE – 15 wt.%, $\text{Al}(\text{OH})_3$ – 40 wt.%, providing the best balance between expansion and mechanical stability.

The effectiveness of intumescent systems is governed not only by the expansion coefficient but also by the structural integrity of the char layer. The proposed component ratio can be recommended for the development of water-based fire-protective coatings with enhanced fire resistance for steel structures.

Key words: intumescent components, expansion coefficient, thermal stability, char strength.

Постановка проблеми. Сталеві конструкції є основними елементами багатьох промислових, житлових та громадських будівель завдяки своїм високим механічним властивостям, довговічності та здатності сприймати значні навантаження. Проте, незважаючи на ці переваги, сталь є матеріалом, чутливим до дії високих температур [1–3]. При температурі понад 500 °C за 5–10 хвилин при прямому впливі температури вона втрачає до 50 % своєї міцності, що може призвести до деформації або навіть руйнування конструктивних елементів будівлі в умовах пожежі, тому цю температуру часто використовують як критичний поріг [4–5].

У зв'язку з цим, забезпечення необхідного ступеня вогнестійкості сталевих конструкцій є критично важливим завданням для збереження несучої здатності будівель і споруд протягом необхідного часу евакуації та роботи пожежно-рятувальних підрозділів. Сучасні нормативні документи, такі як ДБН В.1.1-7:2016, встановлюють мінімальні вимоги до межі вогнестійкості конструкцій, що потребує застосування ефективних засобів вогнезахисту.

У сучасних умовах воєнного стану, збільшення кількості критичних об'єктів інфраструктури, а також розвиток енергоефективного та висотного будівництва підвищують вимоги до надійності та пожежної безпеки металевих конструкцій. Отже, удосконалення методів та засобів вогнезахисту сталевих конструкцій є актуальною науково-технічною проблемою, вирішення якої сприятиме зниженню втрат від пожеж та забезпеченню безпеки людей і матеріальних цінностей.

У системі пасивного вогнезахисту сталевих конструкцій особливе місце займають інтумесцентні (реактивні) покриття, які при дії високих температур утворюють теплоізоляційний шар, що перешкоджає швидкому нагріванню металу. Одним із ключових параметрів ефективності таких покриттів є коефіцієнт спучення, який характеризує здатність матеріалу до кратного

збільшення об'єму з утворенням теплоізоляційного шару. Однак високий коефіцієнт спучення сам по собі не гарантує ефективного вогнезахисту без належної міцності утвореного шару, зокрема його стійкості до руйнування під дією потоків гарячих газів, полум'я та механічних навантажень.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Відомо, що зростання коефіцієнта спучування (K_c) спричиняє зниженню густини пінококсу. Зважаючи на те, що при спучуванні з реакційної маси виходить деяка кількість речовини у вигляді газів та диму, можливо стверджувати, що при сильному спучуванні відбувається послаблення структури пінококсу. Також при великих коефіцієнтах спучування, відповідно до закону збереження маси (навіть без врахування газоподібних втрат), густина пінококсу виявиться недостатньою, аби чинити опір механічним впливам потоків газів під час реальної пожежі, тому визначення міцності пінококсу є пріоритетним завданням. Варто підкреслити, що абсолютне значення коефіцієнта спучення не є мірилом вогнезахисної ефективності, тобто, чим більший параметр K_c , тим вища ймовірність великих значень межі вогнестійкості – це не слушне твердження [6, 7]. Передусім, теплоізоляційна ефективність коксового каркасу за всіх інших однакових умов залежить від структурної цілостності коксового залишку.

Коефіцієнт спучення – важлива характеристика, що визначає здатність покриттів кратна збільшувати свій об'єм під час термічного впливу. Згідно з дослідженнями [8], основними компонентами, що формують піну, є пентаеритрит (ПЕ), який служить джерелом вуглецю, та меламін, що утворює газ. Встановлено, що K_c прямо залежить від співвідношення кислотоутворювача (наприклад, поліфосфату амонію) і карбоновмісного компонента [9–12].

Дослідження [13] показали, що оптимізація співвідношення поліфосфату амонію та

пентаеритриту сприяє утворенню стабільної піни з високим об'ємом, однак надмірне спучення без належної стабілізації може призвести до руйнування шару.

Механічна міцність спученого шару є визначальним фактором тривалості вогнезахисту, особливо в умовах інтенсивного факельного полум'я. Згідно з роботами [14–16], спучений шар повинен бути не лише товстошаровим, але й механічно стабільним, аби витримувати турбулентний потік гарячих газів. Було показано, що додавання гідроксиду алюмінію ($\text{Al}(\text{OH})_3$) та мінеральних наповнювачів (наприклад, каоліну, діоксиду кремнію, графену) зміцнює структуру коксового шару, зменшуючи ризик його руйнування.

Також [18] продемонстрували, що на міцність впливають умови формування піни – зокрема, швидкість нагрівання, розмір пор та рівень зшивання вуглецевої структури.

Коксовий залишок – це вуглецево-мінеральна структура, що залишається після термічного розкладу системи. Він виконує роль теплоізоляційного бар'єра та є показником вогнезахисної ефективності покривів. У працях [18] зазначається, що кількість і якість коксу безпосередньо залежать від складу рецептури та співвідношення її компонентів. Найбільший вплив має пентаеритрит (ПЕ), який забезпечує карбонізацію, та поліфосфат амонію (ПФА), який каталізує дегідратацію та зшивання залишку.

З метою кількісного аналізу ступеня втрати маси зразків залежно від температури, що є важливим параметром для оцінки ефективності вогнезахисного покриття, використовують термогравіметричний аналіз (ТГ). Метод дає змогу визначити температуру початку та завершення термічного розкладу, величину залишкової маси, а також оцінити кількість газоподібних продуктів, що виділяються під час нагрівання [19, 20].

Отримані дані є критично важливими для характеристики інтумесцентних систем, оскільки відображають послідовність хімічних реакцій, що відбуваються під час нагрівання, і дозволяють оцінити здатність композиції утворювати стабільні зшиті вуглецевмісні структури (пінококс). Саме ці структури забезпечують основну теплозахисну функцію покриття, запобігаючи нагріванню підкладки під дією високих температур. Метод ТГ є одним із базових методів оцінювання термічної стабільності та ефективності інтумесцентних вогнезахисних покривів. Його застосування дозволяє кількісно охарактеризувати процеси масової втрати зразків під час нагрівання та визначити температурні межі термічного розкладу компонентів системи.

Невирішені раніше частини загальної проблеми. Незважаючи на значну кількість досліджень, відсутня комплексна оцінка впливу співвідношення ПФА:ПЕ: $\text{Al}(\text{OH})_3$ на механічну стабільність пінококсу, що обмежує можливість оптимізації складу вогнезахисних систем.

Значна частина сучасних досліджень акцентує увагу саме на рецептурних підходах до покращення цих параметрів шляхом добору оптимального співвідношення діючих компонентів, а саме: донора кислоти, карбонізуючого агента, газотворювача, а також різноманітних наповнювачів і наноструктурованих домішок. Водночас залишається актуальним питання комплексного вивчення впливу цих компонентів не лише на коефіцієнт спучення, але й на структурну цілісність коксового залишку, що забезпечує тривалу теплозахисну дію покривів.

Метою даного дослідження є встановлення впливу інтумесцентних компонентів вогнезахисних покривів на водній основі, а саме: поліфосфату амонію, пентаеритриту та гідроксиду алюмінію на коефіцієнт спучення, механічну міцність утвореного теплоізоляційного шару та характеристики коксового залишку з метою оптимізації рецептури покривів для підвищення його вогнезахисної ефективності металевих конструкцій в умовах високих температур.

Завдання дослідження:

1. Встановити вплив співвідношення основних інтумесцентних компонентів, а саме: поліфосфату амонію, пентаеритриту та гідроксиду алюмінію на величину коефіцієнта спучення.
2. Дослідити структурно-механічні властивості утвореного пінококсу вогнезахисних покривів.
3. Визначити оптимальний склад вогнезахисних покривів для максимального ефекту вогнезахисту металевих конструкцій.

Матеріали дослідження. Як плівкоутворювач застосовано стирол-акрилову дисперсію Acronal 290 D (BASF Societas Europaea), яка призначена для виготовлення будівельних клейових матеріалів, фарб, покривів для внутрішніх і зовнішніх робіт, штукатурок із синтетичними смолами й шпаклювальних мас, де потрібна висока в'язкість і високий вміст твердої речовини. Мінімальна температура плівкоутворення (МТП) близько 20 – 23 °С дозволяє формувати плівку за помірних умов. Структура плівки характеризується достатньою міцністю на розрив ($\approx 7 \text{ Н/мм}^2$) і відносним подовженням до $\approx 500 \%$, що забезпечує стійкість до тріщин і деформацій [21].

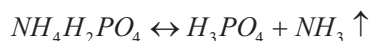
Отримання інтумесцентних покривів зазвичай досягається при використанні трьох компонентів:

джерела неорганічної кислоти, джерела вуглецю, газовиділяючого агента.

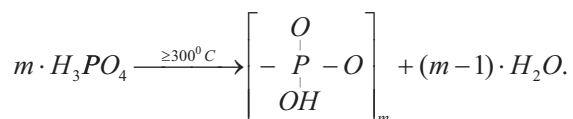
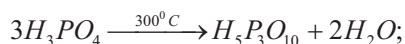
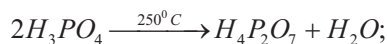
Основні інтумесцентні компоненти вогнезахисного покриття (ВЗП):

– поліфосфат амонію (ПФА) з кристалічною фазою II (ступінь полімеризації $n > 1000$). ПФА – високомолекулярна, термостійка, нерозчинна у воді сполука, що виконує функцію кислотного каталізатора. Під час термічного впливу ПФА поступово розкладається з утворенням фосфорної кислоти (H_3PO_4) та її полімеризованих форм (полі- або метафосфорних кислот). Утворені кислоти каталізують реакції дегідратації вуглецевмісних поліолів (зокрема пентаеритриту), що призводить до інтенсивного карбонізаційного процесу та формування стійкого вуглецевого (кокового) залишку, який є основою теплоізоляційного шару реактивних покриттів [22, 23].

Процес утворення фосфорних кислот при піролізі фосфорвмісних антипіренів описується рівнянням:



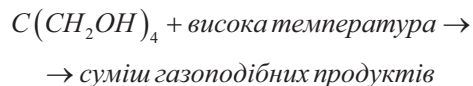
При подальшій термічній деструкції амонійних солей ортофосфорної кислоти утворюються дифосфорна, трифосфорна та поліметафосфорна кислоти, які забезпечують кислотне каталізування реакцій дегідратації, сприяючи інтенсифікації процесу утворення захисного кокового шару:



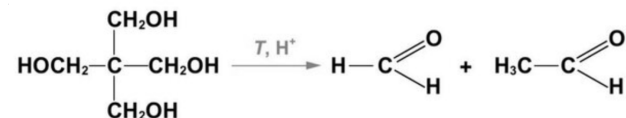
– пентаеритрит (ПЕ) – поліфункціональний чотирьохатомний спирт, який виконує роль джерела вуглецю в інтумесцентних вогнезахисних системах. Під час термічного впливу, у присутності фосфорної кислоти (H_3PO_4) та її полімеризованих форм, що утворюються внаслідок термічної деструкції поліфосфату амонію, пентаеритрит піддається кислотно-каталізованій дегідратації [24].

Хоча пентаеритрит ($C(CH_2OH)_4$) є стабільною сполукою за звичайних умов, він розкладається при нагріванні до високих температур. Цей процес не є простим і протікає з утворенням суміші продуктів, а не за однією конкретною формулою. При термічному розкладанні пентаеритрит виділяє водяну пару, а також розпадається на інші гази, включаючи формальдегід, вуглекислий газ, акролеїноподібні сполуки та воду. Тому немає єдиної формули розкладання для пентаеритриту,

оскільки це складний процес із різними кінцевими продуктами. Натомість, цей процес розкладання можна описати наступною схемою:



Варто зазначити, що якщо нагрівання відбувається в кислому середовищі, пентаеритрит може розкладатися на формальдегід і ацетальдегід [14]:



Гідроксид алюмінію ($Al(OH)_3$) – компонент реактивної системи, що виконує функції газовиділяючого агента. При термічному нагріванні в інтервалі температур 200 – 300 °C гідроксид алюмінію зазнає ендотермічного розкладу з утворенням оксиду алюмінію (Al_2O_3) та виділенням значної кількості водяної пари:



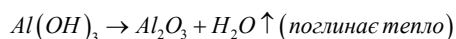
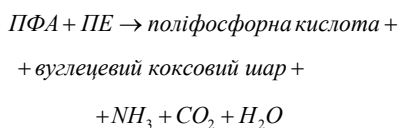
Виділення водяної пари супроводжується поглинанням тепла, що сприяє зниженню температури нагрівання покриття та уповільненню термічних і горючих процесів. Водяна пара виконує роль інертного газу, який зменшує концентрацію кисню біля поверхні матеріалу, тим самим пригнічуючи інтенсивність горіння [25, 26].

Крім того, утворений у результаті термічного розкладу оксид алюмінію підвищує механічну міцність і термостійкість кокового залишку, виконуючи роль армувального мінерального наповнювача. Його присутність сприяє стабілізації структури пінококсу та підвищенню ефективності теплоізоляційного шару при дії високих температур.

Узагальнена реакція термічного розкладу та взаємодії основних компонентів реактивного вогнезахисного покриття відображає послідовність ключових фізико-хімічних процесів, що відбуваються під час дії високих температур. Вона характеризує механізм утворення газо- і теплоізоляційного спіненого шару, який формується внаслідок термічної деструкції та взаємодії активних інгредієнтів системи.

Під час термічного впливу поліфосфату амонію (ПФА) розкладається з утворенням поліфосфорної кислоти, яка каталізує дегідратацію пентаеритриту (ПЕ), сприяючи утворенню карбонізованого (кокового) шару. Одночасно відбувається виділення газоподібних продуктів – аміаку, вуглекислого газу та водяної пари, що забезпечують спінення шару. Гідроксид алюмінію ($Al(OH)_3$) розкладається з утворенням оксиду алюмінію

та водяної пари, при цьому поглинається значна кількість тепла, що додатково знижує температуру поверхні покриву та підсилює його вогнезахисну дію:



Методи дослідження. Сутність методу вимірювання лінійного коефіцієнту спучення полягає в зіставленні розмірів шару покриву до та після термічного впливу. Для цього зразки покриття наносили на сталеві пластини розміром $50 \times 50 \pm 1$ мм і товщиною $2,0 \pm 0,2$ мм. Початкову товщину шару вимірювали штангенциркулем у чотирьох точках і визначали середнє арифметичне значення. Після висихання зразки піддавали нагріванню у лабораторній муфельній печі при температурі 500°C протягом 5 хвилин. Така температура вибрана як більш наближена до критичної температури втрати несучої здатності сталевих конструкцій, порівняно зі стандартними 340°C за ДСТУ-Н-П Б В.1.1-29:2010. Після охолодження товщину спученого шару вимірювали глибиноміром штангенциркуля у п'яти фіксованих точках: одна в центрі зразка, чотири — на рівних відстанях по діагоналях, на 0,25 довжини діагоналі від центру. Лінійний коефіцієнт спучення K_L визначали за формулою (1):

$$K_L = \frac{h_{c1} + h_{c2} + h_{c3} + h_{c4} + h_{c5}}{d_c}, \quad (1)$$

де $h_{c1}, \dots, h_{c5}$ — отримані дані з вимірювання товщини шару інтумесцентного покриву в заданих місцях, мм;

d_c — товщина шару нанесеного покриву, виміряна до проведення випробування, розрахована штангенциркулем як середнє арифметичне з чотирьох вимірювань.

Для кожного складу проводили не менше трьох повторних випробувань, після чого обчислювали середнє значення коефіцієнта спучення.

Міцність сформованого теплоізоляційного шару (пінококсу), отриманого після спучування вогнезахисного покриву, визначали за методикою, запропонованою Lee Jin Sheng (Universiti Tunku Abdul Rahman) [27]. Метод базується на визначенні критичного навантаження, за якого структура пінококсу втрачає цілісність під дією постійного тиску.

Після спучення та охолодження зразків (до температури $25 \pm 2^\circ\text{C}$) поверхню пінококсу навантажували за допомогою щільних вантажів

стандартних розмірів (зовнішній діаметр — 20 мм, товщина — 4,4 мм, внутрішній отвір — 6,4 мм). Початкове навантаження становило 10 г, до якого через підвіску послідовно додавали вантажі по 10 г із короткочасною витримкою (5 с) після кожного кроку. Руйнування або пролом шару фіксували візуально, після чого фіксували критичну масу навантаження (m_k).

Питому міцність шару (σ , г/см²) обчислювали за формулою:

$$\sigma = \frac{m_{kp}}{S} \quad (2)$$

$$F = m_{kp} \cdot g$$

де m_{kp} — критична маса навантаження, г,

S — площа зони контакту навантаження, см².

Площу контакту визначали за формулою площі кола:

$$S = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (3)$$

де d — діаметр навантажувального елемента, см.

Отримані значення питомої міцності (σ , г/см²) характеризують механічну стійкість, структурну цілісність та щільність теплоізоляційного шару, який формується внаслідок спучування вогнезахисного покриву.

Термостабільність і залишкову масу досліджували методом термогравіметричного аналізу (ТГА) на приладі Linseis STA PT1600. Вимірювання проводили в атмосфері повітря при швидкості нагрівання $10^\circ\text{C}/\text{хв}$ у температурному інтервалі $25 - 800^\circ\text{C}$, з точністю визначення температури $\pm 1^\circ\text{C}$. Як еталон використовували $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$.

Таким чином, запропоновані методики дозволяють комплексно оцінити ступінь спучення, механічну стійкість та термостабільність покриттів реактивного типу, що дає можливість кількісно порівнювати їх вогнезахисну ефективність.

Виклад основного матеріалу. Для кількісного аналізу термічної стабільності та визначення ступеня втрати маси зразків залежно від температури, що є одним із ключових показників ефективності вогнезахисних покриттів, застосовано термогравіметричний аналіз (ТГ). Отримані результати є критично важливими для характеристики інтумесцентних систем, оскільки дозволяють встановити їхню здатність до формування стабільних вуглецевмісних (кокових) структур, які забезпечують теплоізоляційні та вогнезахисні властивості покриттів.

На рис. 1 наведено термогравіметричні криві (ТГ) основних компонентів інтумесцентної

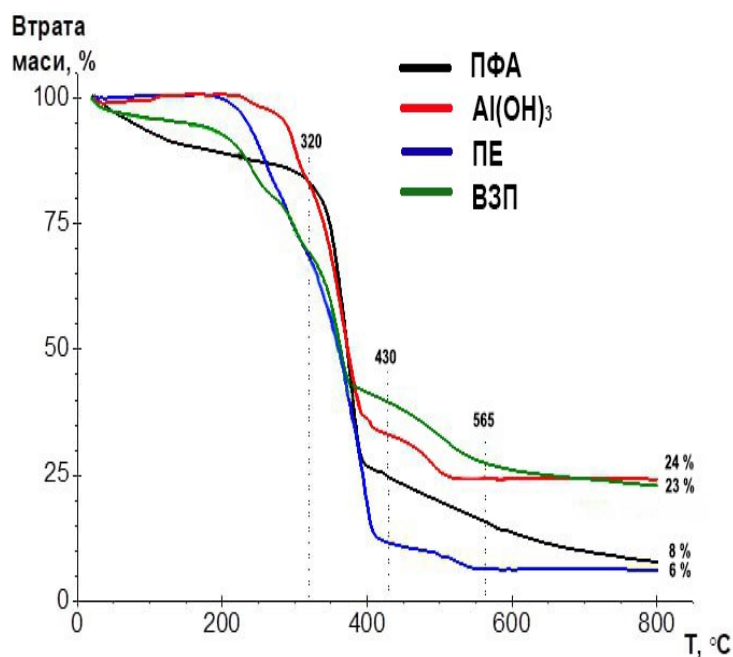


Рис. 1. Термогравіметричні криві зразків покриттів на основі стирол-акрилової дисперсії, наповненої ПФА, ПЕ, $\text{Al}(\text{OH})_3$ та їх спільного використання (ВЗП)

системи: ПФА, ПЕ, $\text{Al}(\text{OH})_3$ та їх спільного використання у складі вогнезахисного покриття (ВЗП).

Дані термогравіметричного аналізу (рис.1.) свідчать, що всі зразки характеризуються багатостадійною термодеструкцією, проте швидкість втрати маси та величина коксового залишку істотно залежать від складу.

ПФА демонструє плавну втрату маси з початком розкладу близько 320°C і формує лише $\approx 8\%$ залишку, що вказує на обмежену здатність до утворення стабільного вуглецевого шару. ПЕ розкладається різко при $260 - 320^\circ\text{C}$, залишаючи мінімальний залишок ($\approx 6\%$) і проявляючи слабку коксоутворювальну здатність. Натомість $\text{Al}(\text{OH})_3$ вирізняється високою термостійкістю: після дегідратації ($\approx 270 - 320^\circ\text{C}$) утворюється беміт ($\gamma\text{-AlOOH}$) і, за вищих температур, оксид алюмінію (Al_2O_3), що забезпечує значний масовий залишок ($\approx 24\%$).

Дослідження поведінки і комплексного впливу інтумесцентних компонентів ВЗП на величину масового залишку демонструють синергічний

ефект – у досліджуваному температурному інтервалі втрата маси становить близько 23% , що перевищує сумарні показники окремих компонентів. Це підтверджує підвищену здатність системи до формування термостійкого ізоляційного шару завдяки поєднанню кислотного каталізатора (ПФА), джерела вуглецю (ПЕ) та газовиділяючого агента ($\text{Al}(\text{OH})_3$).

У табл. 1 наведено узагальнені результати експериментальних досліджень основних компонентів інтумесцентної системи, що характеризують залежність об'ємного коефіцієнта спучення (K_c , $\text{см}^3/\text{г}$), втрати маси зразків (Δm , %) та температури термічної деструкції ($T_{\text{дестр.}}$, $^\circ\text{C}$) за даними термогравіметричного аналізу вогнезахисних покриттів на основі стирол-акрилової дисперсії.

Отримані результати свідчать, що індивідуальні компоненти інтумесцентної системи – ПФА, ПЕ, $\text{Al}(\text{OH})_3$ – проявляють різний вплив на процес термодеструкції та спучування вогнезахисних покриттів.

Таблиця 1

Термічні характеристики основних компонентів інтумесцентної системи

Склад покриттів	K_c , $\text{см}^3/\text{г}$	Δm , % при 600°C	$T_{\text{дестр.}}$, $^\circ\text{C}$
ПФА	0,9	13,5	320
ПЕ	2,81	5,5	250
$\text{Al}(\text{OH})_3$	0	25,5	270
ВЗП	3,2	28,8	260

Покрив, що містить лише ПФА, характеризується низькою здатністю до спучування (коефіцієнт $0,9 \text{ см}^3/\text{г}$) та утворює $13,5 \%$ коксового залишку. У той час ПЕ, що є основним джерелом вуглецю, демонструє помірні показники спучення ($2,81 \text{ см}^3/\text{г}$), що пояснюється наявністю газоподібних продуктів під час його термічного розкладання. Також для покриву, що складається тільки з плівкоутворювача та ПЕ, спостерігається найменше значення коксового залишку ($5,5 \%$), адже за температур більше 500°C пентаеритрит повністю розкладається та сублімується на газоподібні продукти, а коксовий залишок покриву переважно складається із недеструктованих решток плівкоутворювача.

При додаванні до плівкоутворювача гідроксиду алюмінію ($\text{Al}(\text{OH})_3$) не спостерігається схильності покриву до спучування, однак спостерігається утворення значної кількості залишку ($25,5 \%$), що зумовлено утворенням термостійких оксидів алюмінію, здатних виконувати армувальну функцію та підвищувати термостійкість шару.

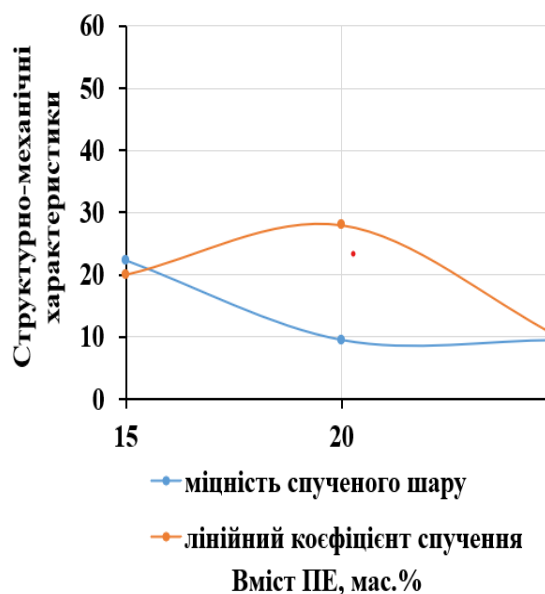
Найвищі показники отримано при спільному поєднанні інтумесцентних компонентів (ВЗП), у якій коефіцієнт спучення сягає $3,2 \text{ см}^3/\text{г}$, а маса коксового залишку – $28,8 \%$. Це свідчить про синергійний ефект між кислотним каталізатором (ПФА), джерелом вуглецю (ПЕ) та газовиділяючим агентом ($\text{Al}(\text{OH})_3$), що забезпечує інтенсивне формування стійкої теплоізоляційної піни.

Така система може бути рекомендована як оптимальний склад інтумесцентного вогнезахисного покриву на основі стирол-акрилової дисперсії.

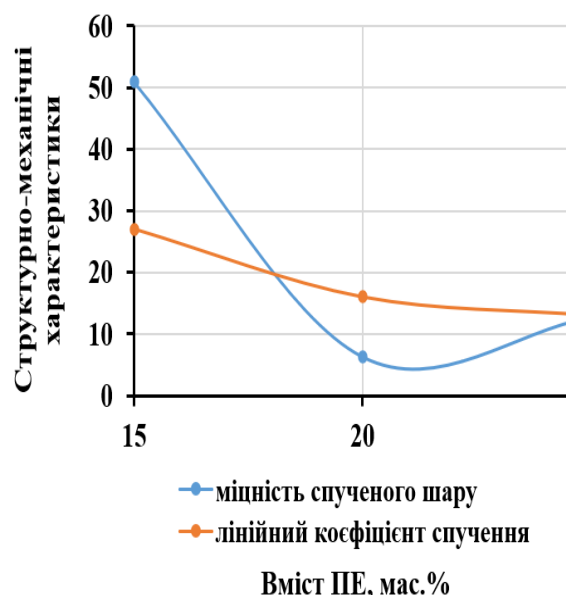
Також отримані результати свідчать, що температура початку деструкції інтумесцентної системи ВЗП становить $\approx 260^\circ\text{C}$, що є нижчою за температуру деградації окремого компоненту гідроксиду алюмінію ($\approx 270^\circ\text{C}$). Така поведінка пояснюється каталітичною дією фосфорних кислот, що утворюються з ПФА, а також реакційною взаємодією між компонентами, зокрема ПЕ та $\text{Al}(\text{OH})_3$. Синергічна дія усіх трьох компонентів системи забезпечує швидше формування теплоізоляційного шару, що є критично важливим для своєчасного захисту металевої конструкції під час впливу високих температур.

З метою встановлення впливу інтумесцентних компонентів на структурно-механічні характеристики вогнезахисного покриву було проаналізовано зміну лінійного коефіцієнта спучення (K_s , мм) та міцності сформованого спученого шару (σ , $\text{г}/\text{см}^2$) за фіксованого вмісту поліфосфату амонію (ПФА) – $25 \text{ мас. } \%$ та різного вмісту гідроксиду алюмінію ($\text{Al}(\text{OH})_3$). На рис. 2 наведено залежність зазначених параметрів при вмісті $\text{Al}(\text{OH})_3$ – $20 \text{ мас. } \%$, а (рис. 2, а) та $\text{Al}(\text{OH})_3$ – $40 \text{ мас. } \%$ (рис. 2, б).

Отриманні залежності при вмісті $\text{Al}(\text{OH})_3$ – $20 \text{ мас. } \%$ (рис. 2, а) свідчать, що при збільшенні



а)



б)

Рис. 2. Залежність міцності спученого шару та лінійного коефіцієнта спучення від вмісту ПЕ у складі вогнезахисного покриву при вмісті $\text{Al}(\text{OH})_3$ – $20 \text{ мас. } \%$ (а) та $\text{Al}(\text{OH})_3$ – $40 \text{ мас. } \%$ (б)

вмісту ПЕ від 15 до 20 мас. % спостерігається суттєве зниження міцності спученого шару, після чого при подальшому зростанні до 25 мас. % зміни стають незначними. Це свідчить, що надлишок ПЕ, який активно генерує газову фазу та сприяє інтенсивному спученню, призводить до утворення більш пористої, менш щільної структури пінококсу, що знижує його механічну стійкість. Лінійний коефіцієнт спучення зростає від 15 до 20 мас. % ПЕ, досягаючи максимуму, після чого знижується при 25 мас.%. Таким чином, при середньому вмісті ПЕ (20 мас. %) спостерігається оптимальна інтенсивність газоутворення, що забезпечує максимальне розширення шару. Подальше збільшення кількості ПЕ призводить до надлишкового спучення, втрати цілісності й часткового руйнування каркасу.

При підвищеному вмісті $\text{Al}(\text{OH})_3$ – 40 мас. % (рис. 2, б) та зниженню ПЕ до 15 мас. % спостерігається найвища міцність спученого шару (55 г/см^2), яка різко знижується при підвищенні частки ПЕ до 20 мас. %, а потім незначно зростає при 25 мас. %. Така поведінка свідчить, що збільшення кількості ПЕ призводить до надмірного газоутворення, формування пористої структури й ослаблення механічного каркасу. Водночас $\text{Al}(\text{OH})_3$ забезпечує певну стабілізацію завдяки утворенню оксидного залишку, тому при 25 мас. % ПЕ відбувається часткове відновлення міцності. При підвищенні частки $\text{Al}(\text{OH})_3$ до 40 мас.% зменшується і загальний ступінь спучення, але значно підвищується міцність шару при малих концентраціях ПЕ, що свідчить про зміцнення пінококсу за рахунок утворення неорганічної оксидної матриці (Al_2O_3).

З метою встановлення взаємозв'язку між ступенем спучення та механічною міцністю пінококсу було досліджено вплив вмісту ПЕ та $\text{Al}(\text{OH})_3$ при фіксованому значенні ПФА на структурно-механічні характеристики вогнезахисного покриття. Отримані результати свідчать, що міцність пінококсу не зростає пропорційно до коефіцієнта спучення, хоча останній безпосередньо впливає на вогнезахисну ефективність металевих конструкцій. Однак високий коефіцієнт спучення сам по собі не гарантує надійного вогнезахисту, якщо утворений шар не має достатньої механічної міцності та стійкості до руйнування під дією потоків гарячих газів, полум'я й механічних навантажень.

Підвищення вмісту гідроксиду алюмінію з 20 до 40 мас.% сприяє збільшенню механічної міцності спученого шару завдяки формуванню термостійкого оксидного каркасу, який зменшує пористість і стабілізує структуру пінококсу. Водночас надлишок $\text{Al}(\text{OH})_3$ обмежує ступінь спучення, знижуючи коефіцієнт розширення.

Таким чином, оптимальне співвідношення компонентів досягається при ПФА(25):ПЕ(15): $\text{Al}(\text{OH})_3$ (40) мас. % та забезпечує найкращий баланс між інтенсивністю спучення та механічною міцністю сформованого коксового шару.

Виявлена обернена кореляція між міцністю пінококсу та коефіцієнтом спучення підтверджує, що зі збільшенням частки ПЕ посилюються процеси газоутворення і, відповідно, спучення, але це супроводжується зниженням механічної стійкості шару. Отже, оптимальний вміст ПЕ близько 15 мас. % забезпечує необхідний компроміс між ступенем спучення та міцністю коксового каркасу, що визначає ефективність і довговічність вогнезахисного покриття під час дії високих температур.

Висновки. За результатами проведених досліджень впливу інтумесцентних компонентів: поліфосфату амонію (ПФА), пентаеритриту (ПЕ) та гідроксиду алюмінію ($\text{Al}(\text{OH})_3$), на структурно-механічні властивості вогнезахисних покриттів на водній становлено:

1. Закономірності впливу співвідношення основних інтумесцентних компонентів (ПФА, ПЕ, $\text{Al}(\text{OH})_3$) на процеси термічного розкладу та спучення. Максимальний коефіцієнт спучення ($K_c \approx 3,2 \text{ см}^3/\text{г}$) досягається при спільному використанні трьох діючих компонентів, що підтверджує їх синергічну дію як кислотного каталізатора, джерела вуглецю та газоутворювального агента.

2. Механічна міцність сформованого пінококсу визначається не лише ступенем спучення, а й кількістю неорганічного залишку. Показано, що збільшення частки ПЕ підвищує інтенсивність газоутворення та коефіцієнт спучення, проте супроводжується зниженням міцності шару через підвищену пористість. Зростання вмісту $\text{Al}(\text{OH})_3$ до 40 мас.% сприяє утворенню стабільного оксидного каркасу (Al_2O_3), який підвищує структурну цілісність і міцність пінококсу.

3. Оптимальний склад інтумесцентного покриття для забезпечення максимальної ефективності вогнезахисту металевих конструкцій встановлено як: ПФА – 25 мас.%, ПЕ – 15 мас.%, $\text{Al}(\text{OH})_3$ – 40 мас.%. За цього співвідношення досягається найкращий баланс між коефіцієнтом спучення та механічною міцністю утвореного коксового шару.

Встановлено, що міцність пінококсу не залежить прямо від величини коефіцієнта спучення. Надмірне розширення шару не забезпечує підвищення його захисних властивостей, якщо знижується структурна щільність і стійкість до механічного руйнування.

Отримані дані мають практичну цінність для розроблення та оптимізації інтумесцентних систем на водній основі, що поєднують високу термостійкість і структурно-механічні властивості при впливі високих температур. Розроблені рекомендації щодо співвідношення компонентів можуть бути використані для створення вогнезахисних покривів із підвищеною довговічністю та ефективністю захисту металевих конструкцій у реальних експлуатаційних умовах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Gordon J. A., Bozeman S. C., Fischer E. C., Isgor O. B., Tucker J. D. Heating duration effects on post-fire structural steel mechanical properties. *Fire Safety Journal*. 2023. Vol. 140. 103848. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103848>.
2. Kumar W., Sharma U. K., Shome M. Mechanical properties of conventional structural steel and fire-resistant steel at elevated temperatures. *Journal of Constructional Steel Research*. 2021. Vol. 181. 106615. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106615>.
3. Afanasenko K., Klyuchka Y., Lypovyi V., Harbuz S. The Thermal Destruction and Coke Formation Intensity Influence on the Delamination and Destruction of Fiber Reinforced Plastics with a Unidirectional Filler under High Temperature Conditions. In *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1038. P. 137–143. Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.137>.
4. Lucherini A., Maluk C. Intumescent coatings used for the fire-safe design of steel structures: A review. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019. Vol. 162. 105712. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105712>.
5. Новак С. В., Добростан О. В., Долішній Ю. В., Ратушний О. В. Оцінювання збіжності результатів експериментального визначення тривалості вогневого впливу до досягнення критичної температури сталі. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2017. № 2. С. 67–72. http://nbuv.gov.ua/UJRN/sbcps_2017_2_11.
6. Цапко Ю., Бондаренко О., Цапко О., Горбачова О., Мазурчук С. Механізм структуроутворення спученого шару пінококсу при впливі мінеральних речовин. *Технічні науки та технології*. 2023. № 2. Вип. 32. С. 379–388. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2\(32\)-379-388](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2(32)-379-388).
7. Березовський А., Копил Б., Іщенко І., Саєнко Н. Вплив співвідношення вогнезахисних компонентів на вогнезахисну ефективність покриттів металевих конструкцій на водній основі. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2023. №7(2). С. 19–28. <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2023.7.2.19.28>.
8. Mariappan T. Recent developments of intumescent fire protection coatings for structural steel: A review. *Journal of fire sciences*. 2016. Vol. 34(2). P. 120–163. <https://doi.org/10.1177/0734904115626720>.
9. Berezovskyi A., Saienko N., Kopyl B., Sidnei S., Tetiana K. Study of the Influence of Fillers on Swelling and Water Absorption of Reactive Fire-Retardant Coatings of Metal Structures. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2025. Vol. 1499 (1). P. 012031. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1499/1/012031>.
10. Li H., Chen X., Sun M., Wu H., Tang L. Synergistic fire retardancy of melamine resin modified with pentaerythritol and ammonium polyphosphate in PP. *Journal of Vinyl and Additive Technology*. 2024. Vol. 30(1). P. 244–262. <https://doi.org/10.1002/vnl.22045>.
11. Wang G., Yang J. Thermal degradation study of fire resistive coating containing melamine polyphosphate and dipentaerythritol. *Progress in Organic Coatings*. 2011. Vol. 72(4). P. 605–611. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2011.07.001>.
12. Григоренко О. М., Золкіна Є. С., Попов Ю. В., Саєнко Н. В. Дослідження впливу наповнювачів на властивості спученого коксового шару епоксидних композицій. *Problems of Emergency Situations: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків, 20 травня 2021 р.)*. Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2021. С. 28–30. http://pesconf.nuczu.edu.ua/images/2021/PES_2021.pdf.
13. Wang J., Xue L., Zhao B., Lin G., Jin X., Liu D., Shang K. (2019). Flame retardancy, fire behavior, and flame retardant mechanism of intumescent flame retardant EPDM containing ammonium polyphosphate/pentaerythritol and expandable graphite. *Materials*. 2019. Vol. 12(24). 4035. <https://doi.org/10.3390/ma12244035>.
14. Guzii S., Kurska T., Otrosh Y., Balduk P., Ivanov Y. Features of the organic-mineral intumescent paints structure formation for wooden constructions fire protection. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1162, No. 1, P. 012003. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1162/1/012003>.
15. Gusii S., Kurska T., Ivanov Y. Features of the organic-mineral intumescent paints structure formation for wooden constructions fire protection. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1162. 012003. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1162/1/012003>.
16. Hryhorenko O., Zolkina Y., Saienko N., Popov Y. Investigation of the Effect of Fillers on the Properties of the Expanded Coke Layer of Epoxy-amine Compositions. In *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1038. P. 539–546. Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.539>.
17. Kalafat K., Taran N., Plavan V., Bessarabov V., Zagoriy G., Vakhitova L. Comparison fire resis-

tance of polymers in intumescent coatings for steel structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 4(10). P. 45–54. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209841>.

18. Vakhitova L., Kalafat K., Taran N., Bessarabov V. Порівняння амінів як газотворювачів вогнезахисних композицій інтумесцентного типу. *Technologies and Engineering*. 2021. № 4.С. 69–80. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2021.4.7>.

19. Nazrun T., Hassan M. K., Hasnat M. R., Hosain M. D., Ahmed B., Saha S. A. Comprehensive review on intumescent coatings: formulation, manufacturing methods, research development, and issues. *Fire*. 2025. Vol. 8(4). 155. <https://doi.org/10.3390/fire8040155>.

20. Саєнко Н. В., Березовський А. І., Копил Б. Я., Григоренко О. М., Джулай О. М. Оцінка термічної стабільності стирол-акрилових покриттів інтумесцентного типу. *Municipal economy of cities*. 2025. №3(191). С. 516–524. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-3-191-516-524>.

21. Saienko N. V., Demidov D. V., Bikov R. A., Younis B. N. Effect of mineral fillers on the wetting of water-based polymer dispersions. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 708(1). P. 012103. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012103>.

22. Hansen–Bruhn I., Craig J. L., Hinge M., Hull T. R. Ammonium polyphosphates: Correlating structure to application. *European Polymer Journal*. 2024. 113644. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2024.113644>.

23. Zheng P., Zhao H., Li J., Liu Q., Ai H., Yang R., Xing W. Recent advances in constructing new type of epoxy resin flame retardant system using ammonium polyphosphate. *Journal of Safety Science and Resilience*. 2024. Vol. 5(2), 179–193. <https://doi.org/10.1016/j.jnlssr.2024.03.002>.

24. Tomczak M., Łopiński J., Kowalczyk A., Kowalczyk K. Thermoplastic intumescent coatings modified with pentaerythritol-occluded carbon nanotubes. *Materials*. 2021. Vol. 14(21). 6284. <https://doi.org/10.3390/ma14216284>.

25. Yan L., Xu Z., Wang X., Deng N., Chu Z. Synergistic effects of aluminum hydroxide on improving the flame retardancy and smoke suppression properties of transparent intumescent fire-retardant coatings. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2018. Vol. 15. P. 1357–1369. <https://doi.org/10.1007/s11998-018-0069-0>.

26. Khalili P., Tshai K. Y., Hui D., Kong I. J. C. P. B. E. Synergistic of ammonium polyphosphate and alumina trihydrate as fire retardants for natural fiber reinforced epoxy composite. *Composites Part B: Engineering*. 2017. Vol. 114. P. 101–110. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.01.049>.

27. Lee J. S. Investigation of Water-based and Solvent-based Polymer Binders on the Fire Protection Performance and Mechanical Properties of Intumescent Coating: doctor's thesis. Universiti Tunku Abdul Rahman, 2019. 118 p. <http://eprints.utar.edu.my/id/eprint/3454>.

REFERENCES

1. Gordon, J. A., Bozeman, S. C., Fischer, E. C., Isgor, O. B., & Tucker J. D. (2023). Heating duration effects on post-fire structural steel mechanical properties. *Fire Safety Journal*, 140, 103848. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103848>.

2. Kumar, W., Sharma, U. K., & Shome, M. (2021). Mechanical properties of conventional structural steel and fire-resistant steel at elevated temperatures. *Journal of Constructional Steel Research*, 181, 106615. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106615>.

3. Afanasenko, K., Klyuchka, Y., Lypovyi, V., & Harbuz, S. (2021). The Thermal Destruction and Coke Formation Intensity Influence on the Delamination and Destruction of Fiber Reinforced Plastics with a Unidirectional Filler under High Temperature Conditions. *In Materials Science Forum*, 1038, 137–143. Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.137>.

4. Lucherini, A., & Maluk, C. (2019) Intumescent coatings used for the fire-safe design of steel structures: A review. *Journal of Constructional Steel Research*, 162, 105712. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105712>.

5. Novak, S. V., Dobrostan, O. V., Dolishniy, Yu. V., & Ratushnyy, O. V. (2017). Otsenka skhodimosti rezul'tatov eksperimental'nogo opredeleniya prodolzhitel'nosti ogneвого vozdeystviya do dostizheniya kriticheskoy temperatury stali [Assessment of the convergence of the results of experimental determination of the duration of fire exposure until the critical temperature of steel is reached]. *Scientific bulletin: Civil protection and fire safety* 2, 67–72. Retrieved from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/sbcpfs_2017_2_11 [in Ukrainian].

6. Tsapko, Yu., Bondarenko, O., Tsapko, O., Gorbacheva, O., & Mazurchuk, S. (2023) Mekhanizm strukturoobrazovaniya vspuchennogo sloya penokoksi pri vozdeystvii mineral'nykh veshchestv [Mechanism of structure formation of a swollen layer of foam coke under the influence of mineral substances]. *Technical sciences and technologies*, 2, 379–388. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2\(32\)-379-388](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2(32)-379-388) [in Ukrainian].

7. Berezovskiy, A., Kopyl, B., Ishchenko, I., & Saienko N. (2023). Vliyanie sootnosheniya ognezashchitnykh komponentov na ognezashchitnuyu effektivnost' pokrytiy metallicheskih konstruktsey na vodnoy osnove [The influence of the ratio of fire-retardant components on the fire-retardant efficiency of water-based coatings for metal structures]. *Nadzvychaini sytuatsii: poperedzhennia ta likvidatsiia*, 7(2), 19–28. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2\(32\)-379-388](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2(32)-379-388) [in Ukrainian].

doi.org/10.31731/2524.2636.2023.7.2.19.28 [in Ukrainian].

8. Mariappan, T. Recent developments of intumescent fire protection coatings for structural steel: A review. *Journal of fire sciences*, 2016, 34(2), 120-163. <https://doi.org/10.1177/0734904115626720>.

9. Berezovskyi, A., Saienko, N., Kopyl, B., Sidnei, S., & Tetiana K. (2025). Study of the Influence of Fillers on Swelling and Water Absorption of Reactive Fire-Retardant Coatings of Metal Structures. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1499(1), 012031. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1499/1/012031> [in Ukrainian].

10. Li, H., Chen, X., Sun, M., Wu, H., & Tang, L. (2024). Synergistic fire retardancy of melamine resin modified with pentaerythritol and ammonium polyphosphate in PP. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 30(1), 244–262. <https://doi.org/10.1002/vnl.22045>.

11. Wang, G., & Yang, J. (2011). Thermal degradation study of fire resistive coating containing melamine polyphosphate and dipentaerythritol. *Progress in Organic Coatings*, 72(4), 605–611. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2011.07.001>.

12. Grigorenko, Ye. M., Zolkina, Ye. S., Popov, Yu. V., & Saienko, N. V. (2021). Issledovaniye vliyaniya napolniteley na svoystva vspuchennogo koksovogo sloya epoksiaminnykh kompozitsiy [Study of the influence of fillers on the properties of the swollen coke layer of epoxyamine compositions]. *Problems of Emergency Situations: proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. (28–30). May 20, 2021. Kharkiv: National University of Civil Defense of Ukraine. 28–30. Retrieved from: http://pesconf.nuczu.edu.ua/images/2021/PES_2021.pdf [in Ukrainian].

13. Wang, J., Xue, L., Zhao, B., Lin, G., Jin, X., Liu, D., & Shang, K. (2019). Flame retardancy, fire behavior, and flame retardant mechanism of intumescent flame retardant EPDM containing ammonium polyphosphate/pentaerythritol and expandable graphite. *Materials*. 2019. Vol. 12(24). 4035. <https://doi.org/10.3390/ma12244035>.

14. Guzii, S., Kurska, T., Otrosh, Y., Balduk, P., & Ivanov, Y. (2021). Features of the organic-mineral intumescent paints structure formation for wooden constructions fire protection. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1162, 1, 012003. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1162/1/012003>.

15. Gusii, S., Kurska, T., & Ivanov, Y. (2021). Features of the organic-mineral intumescent paints structure formation for wooden constructions fire protection. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 1162, 012003. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1162/1/012003>.

16. Hryhorenko, O., Zolkina, Y., Saienko, N., & Popov, Y. (2021). Investigation of the Effect of Fillers on the Properties of the Expanded Coke Layer

of Epoxyamine Compositions. *In Materials Science Forum*, 1038, 539-546. Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.539>.

17. Kalafat, K., Taran, N., Plavan, V., Bessarabov, V., Zagoriy, G., & Vakhitova, L. (2020). Comparison fire resistance of polymers in intumescent coatings for steel structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(10), 45–54. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209841>.

18. Vakhitova, L., Kalafat, K., Taran, N., & Bessarabov, V. (2021). Comparison of amines as blowing agents of flame retardant intumescent type compositions. *Technologies and Engineering*, 4, 69–80. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2021.4.7>.

19. Nazrun, T., Hassan, M. K., Hasnat, M. R., Hossain, M. D., Ahmed, B., & Saha, S. A. (2025). Comprehensive review on intumescent coatings: formulation, manufacturing methods, research development, and issues. *Fire*, 8(4), 155. <https://doi.org/10.3390/fire8040155>.

20. Saienko, N., Berezovskyi, A., Kopyl, B., Hryhorenko, O., Dzhulai, O. (2025). Otsinka termichnoyi stabil'nosti styrol-akrylovykh pokryviv intumescentnoho typu [Evaluation of the thermal stability of styrene-acrylic intumescent coatings]. *Municipal economy of cities*, 3(191), 516–524. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-3-191-516-524> [in Ukrainian].

21. Saienko, N. V., Demidov, D. V., Bikov, R. A., & Younis, B. N. (2019). Effect of mineral fillers on the wetting of water-based polymer dispersions. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 708(1), 012103. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012103>

22. Hansen–Bruhn, I., Craig, J. L., Hinge, M., & Hull, T. R. (2024). Ammonium polyphosphates: Correlating structure to application. *European Polymer Journal*, 113644. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2024.113644>.

23. Zheng, P., Zhao, H., Li, J., Liu, Q., Ai, H., Yang, R., & Xing, W. (2024). Recent advances in constructing new type of epoxy resin flame retardant system using ammonium polyphosphate. *Journal of Safety Science and Resilience*, 5(2), 179–193. <https://doi.org/10.1016/j.jnlssr.2024.03.002>.

24. Tomczak, M., Łopiński, J., Kowalczyk, A., & Kowalczyk, K. (2021). Thermoplastic intumescent coatings modified with pentaerythritol-occluded carbon nanotubes. *Materials*, 14(21), 6284. <https://doi.org/10.3390/ma14216284>.

25. Yan, L., Xu, Z., Wang, X., Deng, N., & Chu, Z. (2018). Synergistic effects of aluminum hydroxide on improving the flame retardancy and smoke suppression properties of transparent intumescent fire-retardant coatings. *Journal of Coatings Technology and Research*, 15, 1357–1369. <https://doi.org/10.1007/s11998-018-0069-0>.

26. Khalili, P., Tshai, K. Y., Hui, D., & Kong, I. J. C. P. B. E. (2017). Synergistic of ammonium polyphosphate and alumina trihydrate as fire retardants for natural fiber reinforced epoxy composite. *Composites Part B: Engineering*, 114, 101–110. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.01.049>.

27. Lee, J. S. (2019). Investigation of Water-based and Solvent-based Polymer Binders on the Fire Protection Performance and Mechanical Properties of Intumescent Coating: doctor's thesis. Universiti Tunku Abdul Rahman, 118 p. Retrieved from: <http://eprints.utar.edu.my/id/eprint/3454>.

© А. І. Березовський, Н. В. Саєнко, Б. Я. Копил, О. М. Григоренко

Науково-методична стаття.

Стаття надійшла до редакції 09.09.2025

Стаття прийнята 26.09.2025

Статтю опубліковано 23.12.2025

DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.47.2025.03>

Р. Б. Веселівський, В. Л. Петровський, І. М. Козира
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
м. Львів, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3266-578X> – Р. Б. Веселівський

<https://orcid.org/0000-0002-5323-7824> – В. Л. Петровський

<https://orcid.org/0009-0006-0368-2977> – І. М. Козира

✉ roman_veselivskuy@yahoo.com

ПОЖЕЖНА НЕБЕЗПЕКА ПРОЦЕСІВ ПІДГОТОВКИ СИРОВИНИ ПІДПРИЄМСТВ ТОРФОБРИКЕТНОГО ВИРОБНИЦТВА

Вступ. Торф'яне виробництво як в Україні, так і у світі є однією з важливих галузей промисловості. Враховуючи світові поклади торфу розвиток даної галузі є перспективним та може бути економічно обґрунтованим особливо для країн, де дані запаси є значними. В Україні обліковується 682 родовища торфу, запасів якого, повинно вистачити на 50 років при планових обсягах виробництва. Ефективним використанням торфу є вироблення торфобрикетів, які використовуються для опалення будівель та споруд різного призначення, що є особливо актуальним сьогодні, коли підприємства нафто-газової промисловості знищуються внаслідок воєнних дій росії проти нашої держави. На даний час на території України функціонує 6 торфобрикетних заводів, що забезпечують паливом житлові приміщення, лікарні, комунальні підприємства тощо. Враховуючи особливості вироблення торфобрикетів та властивості торфу, слід зазначити, що дане виробництво характеризується підвищеною пожежною небезпекою.

Мета. Враховуючи вищезазначене, актуальним є завдання визначення основних причин виникнення та розвитку пожеж на підприємствах торфобрикетного виробництва. Аналіз особливостей технологічного процесу виготовлення брикетів торфу та встановлення причин і місць можливого виникнення пожежі.

Постадійний аналіз пожежної небезпеки технологічного процесу виготовлення брикетів торфу, аналіз нормативних документів та літератури, що регламентують вимоги пожежної безпеки для підприємств торфобрикетного виробництва та висвітлюють особливості виробничих процесів даних підприємств.

Результати. В результаті системного аналізу технологічного процесу брикетування торфу представлено алгоритм даного процесу з виділенням пожежонебезпечних процесів. Обґрунтовано, що найбільшу пожежну небезпеку становлять такі процеси: бункерування торфу (можливе самозагоряння торфу-сировини); механічна підготовка торфу (можливе самозагоряння торфу-сировини); сушіння торфу (можливе самозагоряння торфу-сировини та вибух пилоповітряної суміші); пресування торфу (можливий вибух пилоповітряної суміші). Встановлено, що діючі нормативні документи України не відповідають сучасним вимогам та підходам до організації торфобрикетного виробництва.

Провівши аналіз особливостей технологічного процесу виготовлення брикетів торфу, встановлено, що найбільш пожежо- та вибухонебезпечними місцями є сушильна шахта, шахтний млин та циклоні, де проходять процеси висушування торфу-сировини з вологістю 50% та її осадження в циклонах з вологістю 20%, яка подається на розподільчий конвейєр над пресами пресового відділення і далі на торфобрикетні преси. Встановлено, що сировина торфу може самозагорятись внаслідок самонагрівання через окиснення повітрям. Дані пожежонебезпечні процеси можуть відбуватись на технологічних ділянках бункерування, сушіння та пресування торфу та потребують подальшого вивчення.

Правила пожежної безпеки регламентують вимоги до процесу видобутку торфу, його складування та зберігання, проте не висвітлюють необхідних відомостей щодо пожежовибухобезпечних режимів підприємств з виготовлення брикетів торфу, зокрема чітких рекомендацій для запобігання самозагорянню торфу на кожному з етапів виробництва торфобрикетів.

Ключові слова: пожежна безпека, торф, брикет торфу, самозагоряння, сушіння, джерело запалювання, технологічний процес.

FIRE HAZARD OF RAW MATERIAL PREPARATION PROCESSES AT PEAT BRICK MANUFACTURING ENTERPRISES

Introduction. Peat production is an important industry both in Ukraine and worldwide. Given the global reserves of peat, the development of this industry is promising and can be economically viable, especially for countries with significant reserves. There are 682 peat deposits in Ukraine, whose reserves should last for 50 years at planned production volumes. An effective use of peat is the production of peat briquettes, which are used to heat buildings and structures for various purposes, which is particularly relevant today, when oil and gas industry enterprises are being destroyed as a result of Russia's military actions against our state. Currently, there are six peat briquette factories operating in Ukraine, supplying fuel to residential buildings, hospitals, municipal enterprises, etc. Given the specifics of peat briquette production and the properties of peat, it should be noted that this production is characterized by an increased fire hazard. In view of the above, it is important to identify the main causes of the occurrence and development of fires at peat briquette production enterprises.

Methods. Analysis of the peculiarities of the technological process of manufacturing peat briquettes and establishing the causes and locations of possible fires. Post-event analysis of fire hazards in the technological process of peat briquette production, analysis of regulatory documents and literature governing fire safety requirements for peat briquette production enterprises and highlighting the specific features of the production processes of these enterprises.

Results. As a result of a systematic analysis of the peat briquetting process, an algorithm for this process is presented, highlighting fire-hazardous processes. It has been established that the following processes pose the greatest fire hazard: peat storage (possible spontaneous combustion of raw peat); mechanical preparation of peat (possible spontaneous combustion of raw peat); peat drying (possible spontaneous combustion of peat raw materials and explosion of dust-air mixture); peat pressing (possible explosion of dust-air mixture). It has been established that the current regulatory documents of Ukraine do not meet modern requirements and approaches to the organization of peat briquette production.

After analyzing the characteristics of the technological process of manufacturing peat briquettes, it was established that the most fire- and explosion-hazardous areas are the drying shaft, the shaft mill, and the cyclones, where the peat raw material with a moisture content of 50% is dried and deposited in cyclones with a moisture content of 20%, which is fed to the distribution conveyor above the presses of the pressing department and further to the peat briquette presses. It has been established that peat raw materials can self-ignite as a result of self-heating due to oxidation by air. These fire-hazardous processes can occur in the technological areas of peat bunkering, drying, and pressing and require further study.

Fire safety regulations govern the requirements for peat extraction, storage and preservation, but do not cover the necessary information on fire and explosion safety regimes at peat briquette manufacturing enterprises, in particular clear recommendations for preventing spontaneous combustion of peat at each stage of peat briquette production.

Key words: fire safety, peat, peat briquettes, spontaneous combustion, drying, ignition source, technological process.

Постановка проблеми. Торф'яне виробництво як в Україні так і у світі є однією з важливих галузей промисловості. Враховуючи світові поклади торфу [1, 2] розвиток даної галузі є перспективним та може бути економічно обґрунтованим, особливо для країн, де дані запаси є значними. Згідно з [3] світові площі торфовищ сягають 500 мільйонів гектарів.

В Україні згідно з [4] обліковується 682 родовища торфу, запасів якого, повинно вистачити на 50 років при планових обсягах виробництва. Ефективним використанням торфу є вироблення торфобрикетів, які використовуються для опалення будівель та споруд різного призначення, що є особливо актуальним

сьогодні, коли підприємства нафто-газової промисловості знищуються внаслідок воєнних дій росії проти нашої держави. На даний час на території України функціонує 6 торфобрикетних заводів [5, 6], що забезпечують паливом житлові приміщення, лікарні, комунальні підприємства тощо.

Враховуючи особливості вироблення торфобрикетів та властивості торфу, слід зазначити, що дане виробництво характеризується підвищеною пожежною небезпекою. Прикладом небезпеки таких підприємств є пожежа, яка виникла у 2023 року в галереї подачі первинної сировини на ТзОВ «Лопатинський торфобрикетний завод». Наслідки руйнувань показано на рис. 1.



Рис. 1. Наслідки пожежі в галереї подачі первинної сировини на підприємстві з виробництва брикетів торфу

Враховуючи вищезазначене, актуальним є завдання визначення основних причин виникнення та розвитку пожеж на підприємствах торфобрикетного виробництва.

Огляд публікацій та документів. На даний час в Україні діє 2 основних документи, що регламентують вимоги пожежної безпеки для підприємств торфобрикетного виробництва. Перший це НАПБ В.01.017-80/116 Правила пожежної безпеки для підприємств торф'яної промисловості (ППБО-135-80) [7], а другий – НАПБ А.01.001-2014 Правила пожежної безпеки в Україні [8]. Слід зазначити, що норми які викладені у [7] були прийняті та затверджені у 80-і роки минулого століття та очевидно не відповідають сучасним вимогам та підходам до організації торфобрикетного виробництва. Безпосередньо на пожежну безпеку під час експлуатації таких підприємств впливають: моральне старіння обладнання, механічне зношення торфових машин і устаткування торфобрикетних заводів, а також застарілість галузевої нормативно-технічної документації [9]. Пресувальні машини, сушарки та котли часто виходять з ладу, технологічні лінії дають нерівномірне пресування, вищу вологість брикетів, брак тощо. Тому для відповідності сучасним стандартам екологічності і безпеки підприємства торфобрикетного виробництва потребують модернізації. Скорочення з 37-и до 6-и торфобрикетних заводів з 1991 року [5] також свідчить про існуючу проблему щодо організації належного та безпечного виробництва.

У роботі [10] наголошено на необхідності модернізації виробничих процесів видобування та переробки торфу для ефективного функціонування торфобрикетних заводів України і підвищення енергетичної та екологічної безпеки держави.

Норми [8] регламентують вимоги до процесу видобутку торфу, його складування та зберігання, проте не висвітлюють необхідних відомостей щодо пожежовибухобезпечних режимів підприємств з виготовлення брикетів торфу.

Враховуючи пожежо- та вибухонебезпечні властивості торфу [11, 12] розкриття особливостей виробничих процесів торфобрикетних підприємств є актуальним завданням.

Мета роботи. Аналіз особливостей технологічного процесу виготовлення брикетів торфу та встановлення причин і місць можливого виникнення пожежі.

Методи досліджень. Постадійний аналіз пожежної небезпеки технологічного процесу виготовлення брикетів торфу, аналіз нормативних документів та літератури, що регламентують вимоги пожежної безпеки для підприємств торфобрикетного виробництва та висвітлюють особливості виробничих процесів даних підприємств.

Основний матеріал. Підприємства торфобрикетного виробництва працюють за типовою технологічною схемою, що представлена на рис. 2.

Насамперед слід розуміти, що для виготовлення брикетів торфу, сировина, що надходить на підприємство повинна бути піддана певній технологічній обробці, що перетворить її на якісну вихідну продукцію.

Технологічний процес брикетування торфу типово здійснюється за алгоритмом приведеним на рис. 3.

Процес бункерування торфу здійснюється як правило з використанням залізничного транспорту, який доставляє фрезерний у бункер. Бункери виготовляють з залізобетону, або металу з фіксованими технічними параметрами (висота, об'єм, кут нахилу тощо). Враховуючи фізико-хімічні

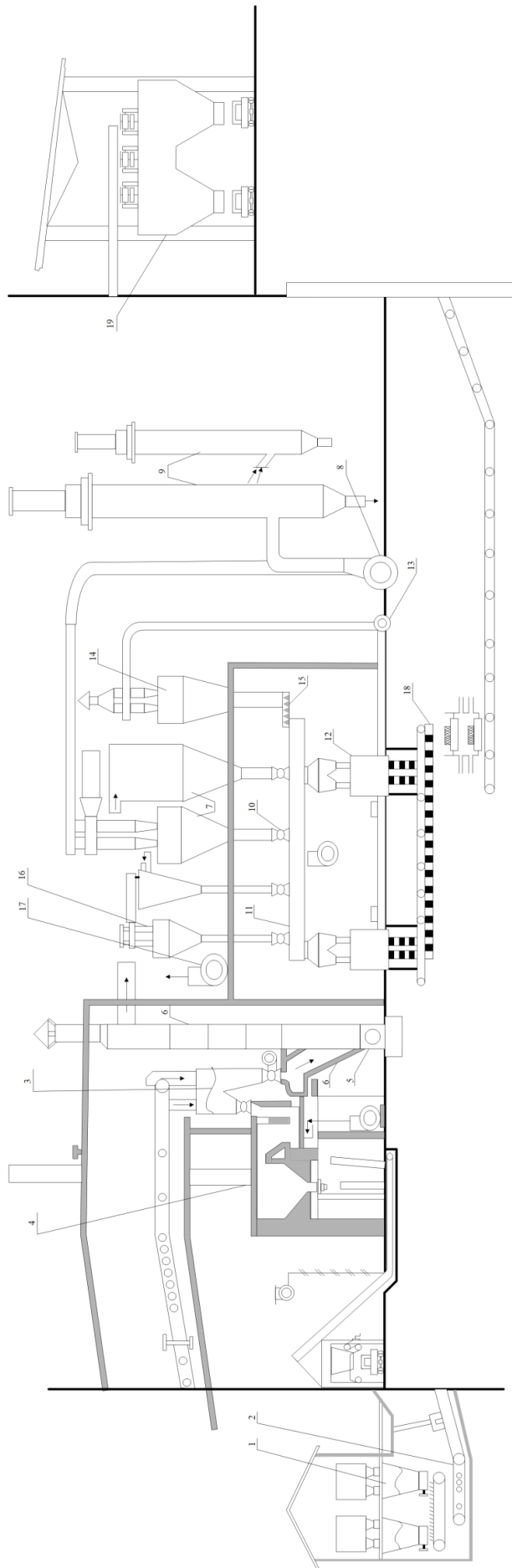


Рис. 2. Типова технологічна схема торфобрикетного виробництва:

- 1 – Бункер сировини, 2 – Конвеєр подачі сировини, 3 – Бункер печі і сушарки, 4 – Технологічна піч, 5 – Шахтний млин, 6 – Шахта, 7 – Циклон осідання торфу, 8 – Димотяг, 9 – Скрубери, 10 – Живильники, 11 – Конвеєр над пресами, 12 – Преси торфобрикетні, 13 – Млинковий вентилятор для шолухи, 14 – Циклон осідання шолухи, 15 – Шнек подачі шолухи, 16 – Циклон системи витяжки від штемцелів, 17 – Вентилятор аспірації штемцелів, 18 – Конвеєр подачі брикетів на склад, 19 – Бункери для брикетів

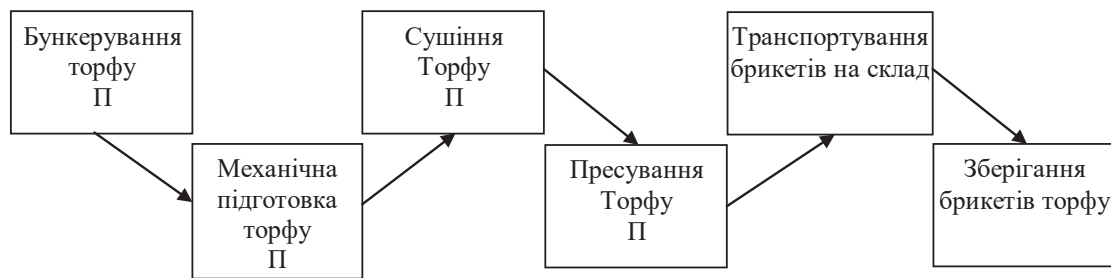


Рис. 3. Алгоритм технологічного процесу брикетування торфу, де літера «П» позначає пожежонебезпечний процес

властивості торфу, а також те, що навіть при 50 % вологості можливе є його самозагоряння [13], важливим є постійний контроль процесу бункерування. Самозагоряння торфу можна охарактеризувати як процес виникнення тління та (або) горіння при відсутності зовнішнього джерела запалювання, або загоряння в результаті екзотермічних процесів, що самоініціюються. В загальному випадку до самозагоряння торфу призводить осідання та накопичення сировини на нерівностях шахт, коробів, шнеків, сушарок а також в місцях їх з'єднання технологічного обладнання. Процес самозагоряння супроводжується самонагріванням сировини з утворенням шару котрий запікається, особливо при підвищенні температури. Чинниками, що сприяють виникненню процесу самозагоряння торфу-сировини уповільнення потоку сировини при транспортуванні, накопичення в шахті сушарки, перевищення встановлених технологічним регламентом температур, тощо. При бункеруванні особливу увагу слід звернути на заходи, що унеможливають зависання торфу на стінках бункеру, зокрема це кут нахилу стінок бункеру та процес його заповнення з подальшим вивантаженням на конвеєр подачі сировини.

Наступним етапом технологічного процесу є механічна підготовка торфу, оскільки у бункер торф поступає з численними сторонніми домішками, що потрапляють у нього під час утворення, видобутку та транспортування до підприємства. Під час подачі торфу до бункера печі та сушарки здійснюється вилучення сторонніх домішок електромагнітним сепаратором, що розташований над конвеєрною стрічкою по якій транспортується торф. На даному етапі виробництва пожежну небезпеку становить надмірне накопичення (налипання) торфу (пилу торфу) на конвеєрній стрічці чи на стінках та нерівностях галереї подачі сировини, що може призвести до самозагоряння торфу з подальшим розповсюдженням пожежі.

Враховуючи вимоги ДСТУ 2042-92 «Брикет торф'яні на комунально-побутові потреби» [14] щодо норм вологості та інших якісних показників

вихідної продукції (табл. 1), слід зазначити, що польовим сушінням таких значень досягнути неможливо. У зв'язку з цим на торфобрикетних підприємствах передбачено процес сушіння в технологічних умовах.

Сушіння торфу становить особливо підвищену пожежну небезпеку, оскільки на даному етапі технологічного процесу відбувається спалювання фрезерного торфу-сировини в технологічній печі з температурою до 900 °С. На торфобрикетних заводах в даний час використовуються переважно пневмогазові сушарки з шахтним млином, де димові гази виконують одночасно дві функції, а саме теплоносія та сушильного агента. Пожежна небезпека таких сушарок, зумовлена можливістю попадання розжарених частинок палива у сушильну камеру, що може спричинити вибух та пожежу при порушенні технологічного режиму чи несправності обладнання. Оптимізація роботи технологічної топки передбачає також одержання димових газів потрібної температури без надмірного її перевищення, оскільки подальше вимушене (для пониження температури газів) додавання холодного повітря неминуче призводить до збільшення вмісту кисню і підвищує небезпеку вибуху. Фрезерний торф-сировина поступає барабанним подавачем в потік димових газів в підсушуючий рукав, шахтний млин, шахту, де відбувається процес сушки торфу, транспортування і осадження в циклонах осідання. Осівший висушений торф вологістю 20% поступає з циклонів через спуски і шлюзові затвори на розподільчий конвеєр над пресами. Температура димових газів в кінці процесу сушки складає до 120 °С. Якщо порушити режим сушіння торфу і перевищити температуру сушіння, це спричинить до загоряння торфу в сушильному тракті, особливо враховуючи те, що температура в кінці процесу сушки різко підвищується до 160 °С і вище. При цьому можливі вибухи в сушильному тракті і спрацювання вибухових клапанів в шахті і циклонах, а запалений торф може потрапити через шлюзові затвори

Норми якісних показників брикетів торфу

№ з/п	Найменування показника	Норма
1	Масова частка загальної вологи в робочому стані палива (W^p), % не більше	20
2	Зольність (A^c), % не більше	23
3	Механічна міцність при випробуванні в барабані (залишок цілих і частково зруйнованих брикетів з розмірами шматків більше 25 мм), % не менше	94
4	Масова частка дрібної фракції зруйнованих (шматки розміром менше 25 мм), % не більше	6
5	Теплота згорання при спалюванні $Q^p_{н, середня}$, МДж/кг	14,9

в пресове відділення на розподільчий конвейєр сушки. Також, одним з основних факторів самозагорання в процесі сушіння торфу, є порушення температурного режиму, яке відбувається при виході з ладу контрольно-вимірювальних приладів, прискорюванні процесу сушіння шляхом підвищення температури, збільшенні часу перебування сировини в сушарці, порушенні процесу завантаження сушильних камер.

Пресування торфу здійснюється у штемпельних пресах. Підсушений до необхідної вологості сировина торфу стискається порційно між торцем штемпеля і стрічкою брикетів. Робочий цикл даного процесу складається з [15]:

- переміщення сировина для брикетів із завантажувальної камери в матричний канал;
- пресування;
- проштовхування брикетів по матричному каналу;
- заповнення сировиною об'єму перед штемпелем.

Якщо порушити технологічний режим, в пресовому приміщенні існує небезпека вибухів пилу торфу від потрапляння запаленого торфу через шлюзові затвори в пресове відділення. Загорання висушеного торфу в пресовому відділенні можливе після займання торфу в сушильному тракті і потраплянні його з циклонів на конвеєр з осередками горіння. Вибухи пилу торфу в пресовому відділенні можливі при відповідній вибухонебезпечній концентрації пилу в повітрі [16, 17].

Процеси транспортування брикетів на складування та зберігання не становлять підвищеної пожежної небезпеки, оскільки процеси, що там відбуваються не є пожежонебезпечними. Пожежа чи загорання може виникнути виключно внаслідок недотримання елементарних правил пожежної безпеки.

Також слід зауважити, що безпосередній вплив на рівень пожежної безпеки має стан та механічне зношення технологічного устаткування, що використовується на підприємствах з вироблення брикетів торфу.

Висновки. Провівши аналіз особливостей технологічного процесу виготовлення брикетів торфу, встановлено, що найбільш пожежо- та вибухонебезпечними місцями є сушильна шахта, шахтний млин та циклони, де проходять процеси висушування торфу-сировини з вологістю 50% та її осадження в циклонах з вологістю 20%, яка подається на розподільчий конвейєр над пресами пресового відділення і далі на торфобрикетні преси.

При порушенні технологічного режиму можливе утворення вибухонебезпечної концентрації пилу в повітрі у пресовому відділенні, а потрапляння запаленого торфу через шлюзові затвори пресового відділення може спричинити вибух.

Встановлено, що сировина торфу може самозагорятись внаслідок самонагрівання через окиснення повітрям. Дані пожежонебезпечні процеси можуть відбуватись на технологічних ділянках бункерування, сушіння та пресування торфу та потребують подальшого вивчення [18].

Також встановлено, що діючі нормативні документи України не відповідають сучасним вимогам та підходам до організації торфобрикетного виробництва. Правила пожежної безпеки регламентують вимоги до процесу видобутку торфу, його складування та зберігання, проте не висвітлюють необхідних відомостей щодо пожежовибухонебезпечних режимів підприємств з виготовлення брикетів торфу, зокрема чітких рекомендацій для запобігання самозагоранню торфу на кожному з етапів виробництва торфобрикетів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. The Natural Fix? – The Role of Ecosystems in Climate Mitigation. Peat distribution in the World. 2014. URL: <https://www.grida.no/resources/7553>.
2. Kolchev K. Peat deposits in Ukraine and in the world: current state, reserves, problems of geological and economic evaluation. Collection of Research Papers of the National Mining University. 2024. Вип. 78. С. 64–77. DOI: 10.33271/crpnmu/78.064.
3. Global Peatlands Assessment: The State of the World's Peatlands – Evidence for Action toward

the Conservation, Restoration, and Sustainable Management of Peatlands. 2022. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/41222>.

4. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2021 році : офіц. сайт. URL: <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnyj-monitoryng/natsionalni-dopovidi-pro-stand-navkolyshnogo-prirodnoho-seredovyssha-v-ukrayini/> (дата звернення 16.10.2025).

5. Pro-consulting, дослідження ринків. Аналіз ринку паливного торфу в Україні. 2023 рік : офіц. сайт. URL: <https://pro-consulting.ua/ua/issledovanie-rynka/analiz-rynka-toplivnogo-torfa-v-ukraine-2023-god> (дата звернення 15.10.2025).

6. Pro-consulting, дослідження ринків. Аналіз ринку торфу в Україні. 2025 рік : офіц. сайт. URL: <https://pro-consulting.ua/ua/issledovanie-rynka/analiz-rynka-torfa-v-ukraine-2025-god> (дата звернення 15.10.2025).

7. Правила пожежної безпеки для підприємств торф'яної промисловості (ППБО-135-80) : НАПБ В.01.017-80/116. Чинний від 01.01.1981. Київ : ГУПО МВС СРСР, 1981.

8. Правила пожежної безпеки в Україні : НАПБ А.01.001-2014. Чинний від 14.08.2024. Київ : МВС України, 2014.

9. Озерчук А. М., Гнеушев В. О. Державний концерн «Укрторф»: перші підсумки, плани та сподівання. Уголь України. 2017. № 5/6. С. 6–9.

10. Гнеушев В. О., Киричук І. М. Проблеми роботи торфобрикетних заводів за нестачі виробничих полів. Збірник наукових праць НГУ. 2016. № 2. С. 43–47.

11. Kukfisz B. The potential fire and explosion hazards in biomass co-firing with conventional fossil fuels based on data obtained during testing. E3S Web of Conferences. 2018. Т. 45. 00039. DOI: 10.1051/e3sconf/20184500039.

12. Półka M. Analysis of susceptibility of peat on its spontaneous heating and self-ignition properties. MATEC Web Conferences. 2018. Т. 247. 00006. DOI: 10.1051/matecconf/201824700006.

13. Ференц Н. О., Павлюк Ю. Е., Гнеушев В. О. Пожежна безпека технологічного процесу брикетування торфу. Пожежна безпека. 2014. № 25. С. 86–90.

14. Брикети торф'яні на комунально-побутові потреби. Технічні умови : ДСТУ 2042-92. Чинний від 01.01.1993. Київ : Український концерн торф'яної промисловості «Укрторф», 1992.

15. Гнеушев В. О. Брикетування торфу : монографія. Рівне : НУВГП, 2010. 167 с.

16. Eckhoff R. K., Li G. Industrial Dust Explosions. A Brief Review. Applied Sciences. 2021. 11(4). 1669. <https://doi.org/10.3390/app11041669>.

17. Батлук В. А., Козира І. М., Климець В. В. Зниження концентрації пилу, як один із шляхів зниження пожежо-вибухонебезпечних факторів промислових викидів пилу. Львівські хімічні читання –

2011 : матеріали тринадцятої наукової конференції, Львів, 28 травня 2011. Львів : ЛНУ ім. І. Франка, 2011. С. Д2.

18. Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація : ДСТУ 8829:2019. Чинний від 01.01.2020. Київ : Технічний комітет «Пожежна безпека та протипожежна техніка» (ТК 25), 2019.

REFERENCES

1. The Natural Fix? – The Role of Ecosystems in Climate Mitigation. (2014). Peat distribution in the World. Retrieved from: <https://www.grida.no/resources/7553>.

2. Kolchev, K. (2024). Peat deposits in Ukraine and in the world: current state, reserves, problems of geological and economic evaluation. Collection of Research Papers of the National Mining University. 78. 64–77. 10.33271/crpnmu/78.064.

3. Global Peatlands Assessment: The State of the World's Peatlands – Evidence for Action toward the Conservation, Restoration, and Sustainable Management of Peatlands. (2022). <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/41222>.

4. Ministerstvo zakhystu dovkillia ta pryrodnikh resursiv Ukrainy – Natsionalna dopovid pro stan navkolyshnogo pryrodnoho seredovyssha v Ukraini u 2021 rotsi [National Report on the State of the Environment in Ukraine in 2021]. Retrieved from: <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnyj-monitoryng/natsionalni-dopovidi-pro-stand-navkolyshnogo-prirodnoho-seredovyssha-v-ukrayini/> [in Ukrainian].

5. Pro-consulting, doslidzhennia rynkiv – Analiz rynku palyvnoho torfu v Ukraini. 2023 rik [Analysis of the fuel peat market in Ukraine. 2023]. Retrieved from: <https://pro-consulting.ua/ua/issledovanie-rynka/analiz-rynka-toplivnogo-torfa-v-ukraine-2023-god> [in Ukrainian].

6. Pro-consulting, doslidzhennia rynkiv – Analiz rynku torfu v Ukraini. 2025 rik [Analysis of the peat market in Ukraine. 2025]. Retrieved from: <https://pro-consulting.ua/ua/issledovanie-rynka/analiz-rynka-torfa-v-ukraine-2025-god> [in Ukrainian].

7. Pravyla pozhezhnoi bezpeky dla pidpriemstv torf'ianoi promyslovosti (PPBO) [Fire safety rules for peat industry enterprises]. (1980). NAPB V. 01.017-80/116 from 1st January 1981. Kyiv: GUPO [in Ukrainian].

8. Pravyla pozhezhnoi bezpeky v Ukraini [Fire safety regulations in Ukraine]. (2014). NAPB A. 01.001-2014 from 14th August 2024. Kyiv: Ministry of Internal Affairs of Ukraine [in Ukrainian].

9. Ozerchuk, A. M., Gneushev, V. O. (2017). Derzhavnyi kontsern "Ukrtoif": pershi pidsumky, plany ta spodivannia [State Concern Ukrtoif: first results, plans, and expectations]. *Uhol Ukrainy*, 5/6, 6–9 [in Ukrainian].

10. Gneushev, V. O., Kyrychuk, I. M. (2016). Problemy roboty torfobryketykh zavodiv za nestachi vyrobnychkh poliv [Problems with peat briquette fac-

tories operating with insufficient production fields]. Zbirnyk naukovykh prats NHU. 2, 43–47 [in Ukrainian].

11. Kukfisz, Bozena. (2018). The potential fire and explosion hazards in biomass co-firing with conventional fossil fuels based on data obtained during testing. *E3S Web of Conferences*. 45. 00039. 10.1051/e3sconf/20184500039.

12. Marzena, Półka. (2018). Analysis of susceptibility of peat on its spontaneous heating and self-ignition properties. *MATEC Web Conferences*. 247 00006. DOI: 10.1051/matecconf/201824700006].

13. Ferents, N. A., Pavluk, Yu. E., Gneushev, V. A. (2014). Pozhezhna bezpeka tekhnolohichnoho protsesu bryketuvannia torfu [Fire safety of technological process of peat briquetting]. *Fire Safety*, 25, 86–90 [in Ukrainian].

14. Brykety torf'iani na komunalno-pobutovi potreby. Tekhnichni umovy [Peat briquettes for municipal and domestic needs. Technical specifications]. (1992). DSTU 2042-92, from 1st January 1993. Kyiv: Ukrainian peat industry concern "Ukrortorf".

15. Gneushev, V.A. (2010). Bryketuvannia torfu [Peat briquetting]: monograph. Rivne, NUVGP, 167 p. [in Ukrainian].

16. Eckhoff, R. K., & Li, G. (2021). Industrial Dust Explosions. A Brief Review. *Applied Sciences*, 11(4), 1669. <https://doi.org/10.3390/app11041669>.

17. Batluk, V.A., Kozyra, I. M, Klymec, V. V. (2011). Znyzhennia kontsentratsii pyly, yak odyz iz shliakhiv znyzhennia pozhezho-vybukhonebezpechnykh faktoriv promyslovykh vykydiv pyly: materials of the thirteenth scientific conference, Lviv, 28 May 2011. Lviv: Ivan Franko National University, P. D2.

18. Pozhezhovybukhonebezpechnist rehovyn i materialiv. Nomenklatura pokaznykiv i metody yikhnoho vyznachennia. Klasyfikatsiia. (2019). [Fire and explosion hazard of substances and materials nomenclature of indices and methods of their determination classification]. DSTU 8829:2019, from 1st January 2020. Kyiv: Technical Committee "Fire Safety and Firefighting Technique" (TC 25). [in Ukrainian].

© Р. Б. Веселівський, В. Л. Петровський, І. М. Козира

Оглядова стаття.

Стаття надійшла до редакції 25.10.2025

Стаття прийнята 12.11.2025

Статтю опубліковано 23.12.2025



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.47.2025.04>

Д. П. Войтович, Р. Ю. Сукач

*Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
м. Львів, Україна*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2280-5585> – Д. П. Войтович

<https://orcid.org/0000-0003-4174-9213> – Р. Ю. Сукач

✉ science_ukr@ukr.net

МОЖЛИВІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ПРОЦЕСІВ УПРАВЛІННЯ ПОЖЕЖНО-РЯТУВАЛЬНИМИ ПІДРОЗДІЛАМИ ПІД ЧАС ГАСІННЯ ПОЖЕЖ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ БПЛА

Мета. Статтю присвячено аналізу можливостей упровадження штучного інтелекту для оптимізації управління пожежно-рятувальними підрозділами під час ліквідації пожеж із використанням дронів та інтелектуальних систем. Мета дослідження полягає в обґрунтуванні застосування штучного інтелекту та математичних моделей підкріплювального навчання для автоматизації управлінських процесів у сфері пожежогасіння. Під час наукового дослідження використовувалися загальнонаукові методи пізнання, зокрема аналіз і синтез, системний підхід, моделювання, узагальнення та порівняння.

Результати дослідження показують, що можливість використання штучного інтелекту в управлінні пожежно-рятувальними підрозділами знаходить підтвердження в сучасній практиці, де поєднання дронів, супутникових систем і наземних сенсорів забезпечує створення комплексних інтелектуальних рішень. Досліджено, що ключовим інструментом формалізації процесу навчання дронів є використання марковських процесів прийняття рішень, що ґрунтуються на п'яти основних компонентах: просторі станів, просторі дій, функції переходів, функції винагороди та коефіцієнті дисконтування. Показано, що ця модель відображає складну динаміку розвитку пожежі та дає змогу враховувати взаємодію безпілотних літальних апаратів із навколишнім середовищем. Особливий акцент зроблено на функції винагороди, яка поєднує в собі параметри ефективності пригашення, економії ресурсів і показники безпеки, створюючи збалансовану систему прийняття рішень. Обґрунтовано, що використання марковських моделей забезпечує формування ієрархічних алгоритмів підкріплювального навчання, що стає науковим підґрунтям для практичної реалізації застосування штучного інтелекту у сфері пожежогасіння. Практичне значення дослідження полягає у можливості створення науково обґрунтованих і технічно реалізованих систем управління пожежно-рятувальними підрозділами з використанням ШІ та дронів, що сприятиме підвищенню безпеки й ефективності ліквідації пожеж.

Ключові слова: штучний інтелект, пожежогасіння, дрони, моделювання, управління.

D. P. Voytovych, R. Yu. Sukach

Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine

THE POSSIBILITY OF APPLYING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TO THE MANAGEMENT OF FIRE AND RESCUE UNITS DURING FIREFIGHTING USING UAVs (DRONES)

Introduction. The article focuses on analyzing the potential of implementing artificial intelligence to optimize the management of fire and rescue units in extinguishing fires through the use of drones and intelligent systems. The purpose of the study is to substantiate the application of artificial intelligence and reinforcement learning mathematical models for automating management processes in the field of firefighting. The research

employed general scientific methods of cognition, including analysis and synthesis, a system-based approach, modeling, generalization, and comparison.

The results demonstrate that the use of artificial intelligence in managing fire and rescue units is confirmed by modern practice, where the integration of drones, satellite systems, and ground sensors enables the development of comprehensive intelligent solutions. It was established that the key tool for formalizing the drone training process is the use of Markov decision processes, which rely on five main components: state space, action space, transition function, reward function, and discount factor. The study shows that this model reflects the complex dynamics of fire development and makes it possible to consider the interaction of unmanned aerial vehicles with the environment. Special attention is given to the reward function, which combines suppression efficiency, resource saving, and safety indicators, thus forming a balanced decision-making system. It is substantiated that the use of Markov models ensures the creation of hierarchical reinforcement learning algorithms, which provide the scientific foundation for the practical application of artificial intelligence in firefighting. The practical value of the study lies in the possibility of creating scientifically grounded and technically feasible management systems for fire and rescue units using AI and drones, which will enhance both safety and efficiency in fire suppression.

Key words: artificial intelligence, firefighting, drones, modeling, management.

Постановка проблеми. Автоматизовані безпілотні літальні апарати останніми десятиліттями стали надзвичайно поширеним інструментом у різних сферах – від сільського господарства та моніторингу інфраструктури до екології, картографування та рятувальних операцій. Їхня популярність зумовлена здатністю виконувати складні завдання у важкодоступних або небезпечних середовищах, де залучення людини пов'язане з високим ризиком. Водночас із 2022 року у зв'язку з воєнними подіями саме для України дрони набули особливої актуальності у військовій площині, ставши елементом національної безпеки та важливим чинником у забезпеченні обороноздатності.

Разом із тим досвід застосування дронів у гасінні пожеж уже давно впроваджується у світовій практиці. Особливої актуальності ця тема набуває для регіонів, де пожежі виникають часто та несуть значну загрозу для людей і довкілля. Використання безпілотників дає змогу зменшити ризик для життя і здоров'я працівників пожежно-рятувальних служб, забезпечуючи можливість оперативного аналізу ситуації та ефективного локального гасіння. Успішність упровадження таких систем значною мірою залежить від того, наскільки правильно дрони будуть запрограмовані для виконання своїх функцій. Це, зі свого боку, визначає внесок у розвиток національної безпеки та підвищення рівня захищеності населення від надзвичайних ситуацій.

Аналіз останніх наукових досліджень і публікацій. Питання можливості застосування штучного інтелекту для процесів управління пожежно-рятувальними підрозділами під час гасіння пожеж є достатньо висвітленим у зарубіжній науковій літературі, водночас у вітчизняних дослідженнях воно лише починає отримувати увагу. Це пояснюється тим, що більшість наукових публікацій присвячена розвитку методів і моделей штучного

інтелекту, зокрема ієрархічного навчання з підкріпленням, які можуть бути адаптовані до завдань управління в екстремальних умовах.

Значний внесок у формування теоретичної основи зробив Р. Bellman [2], який заклав принципи динамічного програмування, що стали фундаментом для сучасних методів оптимізації у складних середовищах. П. Dayan та Г. Е. Hinton [4] уперше розглянули концепцію феодального підходу до навчання з підкріпленням, що дало змогу структурувати завдання різного рівня складності. Розвитком цієї ідеї став підхід Т. Г. Dietterich [5], який запропонував декомпозицію функції цінності (MAXQ), що забезпечує ефективніше управління багаторівневими процесами. Зі свого боку, Р. С. Sutton, Д. Precup та С. Singh [8] сформулювали концепцію напів-МПП (semi-MDPs), яка дала можливість працювати із часовими абстракціями. Сучасні розробки, зокрема А. С. Vezhnevets та співавторів [9], адаптують ці підходи у вигляді нейронних мереж для ієрархічного навчання.

У прикладному аспекті варто відзначити дослідження М. N. Alpdemir [1], спрямоване на планування траєкторій тактичних БпЛА в умовах радіолокаційної загрози із застосуванням ієрархічного навчання з підкріпленням (HRL), що поєднує метаконтролер для призначення цілей і контролер на основі DQN для вибору дій. Доцільно виділити дослідження У. Cheng і співавторів [3], яке присвячене плануванню траєкторій БпЛА у динамічному середовищі з використанням алгоритму SA-MAXQ, який поєднує MAXQ та метод імітації підпалу для підвищення ефективності навчання, а також реалізує кооперативну формацію типу «лідер – ведений» із динамічною мертвою зоною для оптимізації руху кількох БпЛА.

Дослідження К. Kou та колег [6] присвячене автономній навігації безпілотних літальних апаратів (БпЛА) із використанням ієрархічного

навчання з підкріпленням на основі опцій, що поєднує високорівневу модель вибору поведінки та дві низькорівневі моделі – уникнення перешкод і досягнення цілі. Зі свого боку, Т. Ren і співавтори [7] розробили масштабовану дворівневу архітектуру НТЗО для керування у великих мобільних мережах із залученням БпЛА в контексті мобільних обчислень на периферії (МЕС). Натомість Y. Zhang із колегами [10] запропонували багаторівневу систему збору даних за участі кількох БпЛА для бездротових сенсорних мереж із зворотним розсіюванням сигналу, де алгоритми глибокого ієрархічного навчання забезпечують мінімізацію часу польоту, кооперативне навчання та підвищення ефективності збору інформації у надзвичайних ситуаціях.

Серед вітчизняних дослідників варто виділити Ю. О. Даника та Д. О. Кіріченка [11], які проаналізували можливості застосування систем штучного інтелекту у сфері пожежної безпеки. Хоча робота має загальний характер, вона закладає основу для подальшої інтеграції зарубіжних методологічних підходів у практику функціонування пожежно-рятувальних підрозділів.

Методологія та методи. Методологія дослідження ґрунтується на загальнонаукових підходах аналізу, синтезу та системного моделювання, що дає можливість комплексно розглядати процес управління пожежно-рятувальними підрозділами з використанням дронів як складну динамічну систему. У межах методики застосовується математичне моделювання на основі марковських процесів прийняття рішень, яке забезпечує формалізацію взаємодії безпілотних літальних апаратів із середовищем, а також використання підкріплювального навчання та його ієрархічних узагальнень для побудови алгоритмів ефективного розподілу ресурсів, планування траєкторій і мінімізації ризиків у надзвичайних ситуаціях.

Метою статті є обґрунтування можливості застосування штучного інтелекту та математичних моделей підкріплювального навчання для автоматизації управління пожежно-рятувальними підрозділами із використанням дронів у процесі гасіння пожеж. Для досягнення поставленої мети у статті буде досліджено можливість і сучасну практику застосування штучного інтелекту у сфері пожежогасіння, а також показано особливості навчання дронів ефективно виконувати завдання на основі попереднього навчання та програмування, що дає змогу адаптувати їх до складних умов реальних надзвичайних ситуацій.

Виклад основного матеріалу. Сьогодні системи управління пожежно-рятувальними підрозділами дедалі більше набувають ознак

автоматизації. Це зумовлено як зростанням масштабів пожеж, так і потребою у швидкому реагуванні в умовах, де людські ресурси та традиційні методи організації роботи часто виявляються недостатньо ефективними. У світовій практиці активно впроваджуються автономні технології, серед яких важливу роль відіграють безпілотні літальні апарати (БпЛА), оснащені інтелектуальними алгоритмами. Такі апарати здатні самостійно аналізувати теплові карти пожежі, виявляти найбільш критичні зони загоряння та спрямовувати свої дії на локалізацію вогню там, де це забезпечує найбільший ефект. Вони виступають не лише як виконавці команд оператора, але і як активні агенти системи штучного інтелекту, здатні приймати рішення в режимі реального часу [6].

Сучасна практика гасіння пожеж із використанням штучного інтелекту формується на перетині робототехніки, картографування та систем моніторингу. Одним із прикладів є рішення FireAI, яке інтегрує алгоритми машинного навчання з платформою Nova Maps. Це дає можливість дронам і наземним операторам не лише отримувати ортомозаїки та теплові зображення в реальному часі, але й накладати на карту спеціалізовані іконки з Wildfire Icon Pack. Завдяки цьому пожежні-рятувальники отримують точне та зрозуміле відображення гарячих точок, напрямку вітру, небезпечних зон і розташування ресурсів. Автоматизація таких процесів зменшує когнітивне навантаження на операторів, сприяючи швидшому ухваленню рішення й зосередженню на безпосередньому управлінні підрозділами [11].

Додатковим прикладом є проєкт OVERWATCH, який розробляє алгоритми для картографування повеней і пожеж із використанням супутникових даних Sentinel та знімків із дронів. Тут штучний інтелект застосовується для підвищення просторової роздільної здатності зображень до п'яти метрів, що суттєво покращує точність визначення контурів пожежі. На практиці це означає, що пожежні-рятувальники отримують детальні карти в реальному часі, де відображаються території згарища, динаміка поширення полум'я та пріоритетні напрямки введення технічних засобів подачі вогнегасних речовин. Випробування цієї технології на реальних прикладах в Іспанії показали, що алгоритми можуть напівавтоматично виділяти згорілі ділянки з високою точністю, тим самим оптимізуючи розподіл наявних ресурсів та маршрутів дронів і наземної техніки [11].

Ще один приклад дає програма ALERTCalifornia, яка спирається на мережу з понад тисячі високоточних камер, розміщених по всій Каліфорнії. Ці камери здатні працювати

цілодобово, обертаючись на 360 градусів та охоплюючи десятки миль. Алгоритми штучного інтелекту аналізують відеопотоки й автоматично виявляють аномалії, що можуть свідчити про початок займання. Тож пожежні-пожежники отримують сповіщення з географічними координатами та рівнем упевненості системи ще до того, як надходить перший дзвінок до служби порятунку 911. Наведено практичний випадок: у вересні 2023 року штучний інтелект виявив займання більш ніж на пів години раніше, ніж люди повідомили про пожежу. Це дало можливість обмежити площу загоряння менш ніж чвертю акра, що демонструє реальну користь такої системи у зменшенні наслідків стихійних лих [11].

Усі ці приклади показують, що штучний інтелект у сфері пожежогасіння виконує роль не лише допоміжного інструменту, а й критичного елемента сучасних стратегій реагування. Він здатен інтегрувати дані з дронів, супутників і наземних камер, створювати карти з високою деталізацією, а також попереджати про загрози значно швидше, ніж це можуть зробити традиційні методи. У такий спосіб технології забезпечують більш безпечне й ефективне керування операціями в умовах надзвичайних ситуацій.

Однак побудова таких систем потребує розв'язання фундаментальної проблеми навчання. Якщо пожежно-рятувальні підрозділи традиційно діють на основі регламентів та досвіду, то дрони потребують алгоритмів, що дають їм можливість навчатися ефективних стратегій у процесі взаємодії зі складним та динамічним середовищем. У цьому контексті ключовим є застосування математичного апарату підкріплювального навчання (Reinforcement Learning, RL), який формалізує процес прийняття рішень у вигляді послідовності дій і реакцій середовища. Витоки такого підходу сягають теорії динамічного програмування Р. Беллмана [2], яка заклала основу для формування концепції оптимального управління у стохастичних середовищах.

Сучасні дослідження у сфері RL спираються на марковські процеси прийняття рішень (Markov Decision Processes, MDP), що дають змогу описати поведінку агента через формалізацію станів, дій, функції переходів і функції винагород [8]. Саме така структура забезпечує математичний інструментарій для навчання безпілотних апаратів, які виконують завдання в непередбачуваних умовах пожежі.

Водночас класичні методи RL виявляють обмеження у випадках, коли простори станів і дій є надто великими, а винагороди – рідкісними чи відстроченими. Для вирішення цих

проблем було запропоновано ієрархічне підкріплювальне навчання (Hierarchical Reinforcement Learning, HRL). Його розвиток пов'язаний із роботами Діттеріха (MAXQ-декомпозиція функцій цінності) [5], концепцією options framework [8], а також із підходами так званого феодального навчання [4]. У випадку дронів для пожежно-рятувальних підрозділів HRL дає змогу будувати багаторівневі структури управління, де вищий рівень відповідає за стратегічний вибір цілей (наприклад, блокування поширення вогню в певному секторі), а нижчі рівні реалізують конкретні тактичні дії (зміна траєкторії, скид води чи піни).

Застосування HRL для дронів уже продемонстроване у сфері навігації та планування траєкторій у складних середовищах [6], а також у задачах багатодронової координації [3]. Окремим напрямом досліджень є використання HRL для розподілу ресурсів у мобільних обчислювальних середовищах, що підтверджує універсальність цього підходу [7]. Усі ці напрацювання створюють підґрунтя для адаптації методів HRL до специфіки пожежогасіння, де навчання агентів може здійснюватися на симуляційних моделях поширення пожежі, а функція винагороди має враховувати ефективність локалізації вогню, економію ресурсів і безпеку підрозділів.

Таким чином, автоматизація управління пожежно-рятувальними підрозділами із застосуванням дронів на основі штучного інтелекту є неможливою без використання математичного моделювання. Марковські процеси прийняття рішень забезпечують необхідний теоретичний фундамент, тоді як ієрархічні методи RL дають змогу формувати багаторівневі алгоритми, здатні ефективно працювати у складних умовах надзвичайних ситуацій.

Навчання дронів для підтримки пожежно-рятувальних операцій природно формалізується як марковський процес прийняття рішень (S, A, P, R, γ) , де:

S – простір станів, що кодує поточну конфігурацію пожежі та ресурсів (наприклад, поле інтенсивності горіння або індикатор зайнятості осередків на сітці, метеопараметри – вектор вітру, вологість, температура, положення та швидкості дронів, залишок вогнегасної речовини й заряд акумуляторів);

A – простір дій, який охоплює безперервні керуючі впливи типу u_t^i (вектор швидкості / тяги i -го дрона) і d_t^i (інтенсивність скидання вогнегасної речовини), а також дискретні команди, наприклад повернення на базу;

$P(ds_{t+1} | s_t, a_t)$ – стохастичний оператор переходів, що відображає еволюцію стану під діями

дронів та зовнішньої стохастики (модель поширення пожежі, збурення вітру тощо);

$R(s_t, a_t)$ – миттєва винагорода;

$\gamma \in (0, 1)$ – коефіцієнт дисконтування, який визначає вагу майбутніх наслідків відносно поточних.

Оптимізаційна мета полягає у відшуванні політики π максимізації знеціненого сумарного виграшу $\pi [\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t R(s_t, a_t)]$, що є безпосереднім наслідком динамічного програмування та марковського підходу до керування у стохастичних середовищах [2; 8].

Суть математичної моделі винагороди полягає в узгодженні трьох протилежних чинників: ефективності пригашення, ощадного використання ресурсів і безпеки (ризiku). Зручно використовувати зважену адитивну структуру:

$$R(s_t, a_t) = \alpha S(s_t, a_t) - \beta C(s_t, a_t) - \eta \Xi(s_t, a_t),$$

де S – «корисність» гасіння, що кількісно вимірює запобігання поширенню вогню на короткому прогнозованому горизонті;

C – витрати ресурсів (вода / піна, енергія, час простою / перельоту);

Ξ – показник ризику (підльоти до небезпечних зон, перетин заборонених секторів повітряного простору, наближення до пожежних-рятувальників);

$\alpha, \beta, \eta > 0$ – ваги, що задають компроміси між цими критеріями. Така форма сумісна як із табличними / градієнтними методами RL, так і з їх ієрархічними узагальненнями для багаторівневого планування дій дронів [8].

Приклад формулювання для зменшення площі пожежі будується на контрфактичному порівнянні з пасивною динамікою.

Нехай: $A(t) = \int_{\Omega} \chi_{burn}(x, y, t) dx dy$ – площа активного горіння в момент t (де χ_{burn} – індикатор зайнятих вогнем осередків на області Ω).

$A^{0(t+\Delta)}$ – прогноз площі через крок Δ без втручання;

$A^{a(t+\Delta)}$ – прогноз за умови застосування дії a_t з поточного стану s_t (обидва прогнози отримуються тією самою моделлю поширення за однакових зовнішніх умов). Тоді «корисність» пригашення на кроці:

$$S(s_t, a_t) = \frac{A^0(t+\Delta) - A^a(t+\Delta)}{A^0(t+\Delta) - A(t) + \varepsilon},$$

де в знаменнику – нормувальна величина приросту площі за умовно-стабільного або пасивного сценарію на інтервалі $[t, t+\Delta]$,

$\varepsilon > 0$ – малий стабілізатор.

Така нормалізація забезпечує масштабну інваріантність і робить $S \in [0, 1]$ у типових режимах.

Для врахування неоднорідної цінності території можна ввести просторові ваги $w(x, y)$ (критична інфраструктура, населені пункти) і замінити площу на «зважену» інтенсивність:

$$S(s_t, a_t) = \frac{\int \Omega w(x, y) [I^0(x, y, t + \Delta) - I^a(x, y, t + \Delta)] + dx dy}{\int \Omega w(x, y) I^0(x, y, t + \Delta) dx dy + \varepsilon},$$

де s_t – стан системи у момент часу t (опис пожежі, положення дронів, наявні ресурси тощо);
 a_t – дія, яку виконують дрони в момент часу t (скидання порошку, маневр, зміна швидкості тощо);

Ω – область, де моделюється поширення пожежі (наприклад, обмежений квадрат на карті місцевості, розбитий на клітинки);

$w(x, y)$ – просторові ваги, що задають цінність території у точці з координатами (x, y) . Наприклад:

$w(x, y) = 1$ у «звичайному» лісі;

$w(x, y) > 1$ для критичної інфраструктури, населених пунктів, об'єктів з високим ризиком;

$I^0(x, y, t + \Delta)$ – прогнозована щільність тепловиділення (або інший показник сили пожежі) у точці (x, y) у момент часу $t + \Delta$, якщо дрони не втручаються (пасивна динаміка поширення вогню);

$I^a(x, y, t + \Delta)$ – прогнозована щільність тепловиділення в тій самій точці та в той самий момент часу, але з урахуванням дії a_t , яку виконали дрони на кроці $[t, t + \Delta]$;

$[\cdot]$ – оператор позитивної частини. Він гарантує, що враховується лише зменшення інтенсивності пожежі. Якщо дії випадково погіршили ситуацію ($I^a > I^0$), то внесок у чисельник не додається;

$\varepsilon > 0$ – малий стабілізатор, щоб уникнути ділення на нуль (наприклад, якщо в прогнозі без втручання вогонь повністю згасає).

Зміст формули такий: у чисельнику відображається зважене зменшення інтенсивності пожежі, яке вдалося досягти завдяки дії дронів за короткий прогнозований крок Δ . Це фактично «користь» від втручання.

У знаменнику стоїть прогнозована інтенсивність пожежі в пасивному сценарії, зважена тими ж коефіцієнтами. Вона виконує роль нормованої величини, щоб показник S завжди лежав у проміжку $[0, 1]$.

Значення S можна тлумачити як частку відверненої шкоди. Якщо $S \approx 0$ – дія не дала ефекту, якщо $S \approx 1$ – дрон повністю ліквідував приріст пожежі на цьому кроці у всіх значущих зонах.

Така конструкція безпосередньо узгоджується з постановками RL/HRL: верхній рівень може

працювати з вагами w (стратегічні пріоритети), а нижчий – реалізовувати мікродії, що максимізують локальний внесок у чисельник [5].

Приклад деталізації ресурсу передбачає розклад витрат на гідравлічну складову (вода / піна), енергетику польоту та часові витрати логістики. Для M дронів на кроці $[t, t+\Delta]$ формулу можна записати таким чином:

$$C(s_t, a_t) = \sum_{i=1}^M \left(k_w \int_t^{t+\Delta} d_t^i d\tau + k_e \int_t^{t+\Delta} (c_0 + c_1 \|u_\tau^i\|^2) d\tau + k_l \Delta T_{\text{лог}}^i \right),$$

де d_t^i – миттєва витрата вогнегасної рідини i -м дроном;

u_τ^i – керуючий вектор (пропорційний повітряній швидкості / тязі);

$c_0, c_1 > 0$ – параметри енергетичної моделі (базове споживання та квадратичний штраф за швидкість);

$\Delta T_{\text{лог}}^i$ – еквівалентний час логістичних операцій (маневри до точки скидання, повернення на базу для перезавантаження);

$k_w, k_e, k_l > 0$ – вартісні коефіцієнти.

За потреби до математичної моделі можна включити штраф за пікові витрати $\dot{d}_t$ для запобігання «залпам» і поліпшення змочування: наприклад, додатковий доданок $k_{\text{peak}} \int (d_t^i)^2 dt$.

Безпеку $\Xi(s_t, a_t)$ моделюють як інтеграл перетину траєкторій дронів із полем небезпеки $h(x, y, t)$ (круті схили, вибухонебезпечні зони, коридори польотних обмежень) та/або як штраф за наближення до наземних підрозділів нижче за допустимий радіус, причому великі порушення кодуються бар'єрними штрафами, щоб політика навчалась їх суворо уникати.

Узгодження вищенаведених складових у $R(s_t, a_t)$ забезпечує прозору інтерпретацію компонентів і придатність як до одноагентного, так і до багатоагентного навчання; за ієрархічної організації можна, наприклад, на верхньому рівні максимізувати зважену «стратегічну» корисність S за обмежень на агреговані ресурси, тоді як нижні рівні мінімізують локальні C за фіксованих підцілей. Така марковська постановка та вибір функції винагороди відповідають загальним принципам оптимального керування з підкріпленням і підтверджуються як теоретичними засадами, так і практикою у застосунках до безпілотних платформ.

Висновки. Можливість застосування штучного інтелекту в управлінні пожежно-рятувальними підрозділами підтверджується сучасною практикою, де дрони, супутникові системи та наземні сенсори інтегруються в єдині інтелектуальні комплекси. Такі рішення, як FireAI, OVERWATCH та ALERTCalifornia, демонструють, що ШІ здатний

не лише здійснювати моніторинг розвитку пожежі, але й забезпечувати оперативне картографування, раннє виявлення загроз та підтримку координації ресурсів. На практиці це дає змогу скоротити час реагування, зменшити площу пожежі та знизити ризики для життя людей і довкілля. Автоматизація на основі алгоритмів машинного навчання суттєво підвищує ефективність гасіння, роблячи дрони активними учасниками операцій, які самостійно приймають рішення в реальному часі.

Математичне моделювання процесів навчання дронів у такому контексті природно реалізується через марковські процеси прийняття рішень. Ця модель описується п'ятьма ключовими елементами: простором станів, простором дій, функцією переходів, функцією винагороди та коефіцієнтом дисконтування. Вона дає можливість формалізувати складну динаміку поширення пожежі та взаємодію дронів із середовищем. Особливе значення має функція винагороди, яка поєднує ефективність пригашення, витрати ресурсів і показники безпеки, забезпечуючи баланс між цими суперечливими критеріями. Таким чином, марковська модель є теоретичним фундаментом для побудови ієрархічних алгоритмів підкріплювального навчання, що робить застосування ШІ у сфері пожежогасіння науково обґрунтованим і практично реалізованим.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Alpdemir M. N. A hierarchical reinforcement learning framework for UAV path planning in tactical environments. *Turkish Journal of Science and Technology*. 2023. Vol. 18. P. 243–259. <https://doi.org/10.55525/tjst.1219845>.
2. Bellman R. The theory of dynamic programming. *Bulletin of the American Mathematical Society*. 1954. Vol. 60. P. 503–515. <https://doi.org/10.1090/S0002-9904-1954-09848-8>.
3. Cheng Y., Li D., Wong W. E., et al. Multi-UAV collaborative path planning using hierarchical reinforcement learning and simulated annealing. *International Journal of Performance Engineering*. 2022. Vol. 18. P. 463–474. <https://doi.org/10.23940/ijpe.22.07.p1.463474>.
4. Dayan P., Hinton G. E. Feudal reinforcement learning. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 1992. № 5. P. 272–278. URL: <https://papers.nips.cc/paper/1992/file/d14220ee66aeec73c49038385428ec4c-Paper.pdf>.
5. Dietterich T. G. Hierarchical reinforcement learning with the MAXQ value function decomposition. *Journal of Artificial Intelligence Research*. 2000. Vol. 13. P. 227–303. <https://doi.org/10.1613/jair.639>.
6. Kou K., Yang G., Zhang W., et al. Autonomous navigation of UAV in dynamic unstructured environments via hierarchical reinforcement learning. *International*

Conference on Automation, Robotics and Computer Engineering (ICARCE), Wuhan, 2022, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICARCE55724.2022.10046655>.

7. Ren T., Niu J., Dai B., et al. Enabling efficient scheduling in large-scale UAV-assisted mobile-edge computing via hierarchical reinforcement learning. *IEEE Internet of Things Journal*. 2021. Vol. 9. P. 7095–7109. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3071531>.

8. Sutton R. S., Precup D., Singh S. Between MDPs and semi-MDPs: a framework for temporal abstraction in reinforcement learning. *Artificial Intelligence*. 1999. Vol. 112. P. 181–211. [https://doi.org/10.1016/S0004-3702\(99\)00052-1](https://doi.org/10.1016/S0004-3702(99)00052-1).

9. Vezhnevets A. S., Osindero S., Schaul T., et al. Feudal networks for hierarchical reinforcement learning. International Conference on Machine Learning, Sydney, 2017, 3540–3549. URL: <https://proceedings.mlr.press/v70/vezhnevets17a/vezhnevets17a.pdf>.

10. Zhang Y., Mou Z., Gao F., et al. Hierarchical deep reinforcement learning for backscattering data collection with multiple UAVs. *IEEE Internet of Things Journal*. 2021. Vol. 8 (5). P. 2808–2821. URL: <https://www.scribd.com/document/902432515/Hierarchical-Deep-Reinforcement-Learning-for-Backscattering-Data-Collection-With-Multiple-UAVs>.

11. Даник Ю. О., Кіріченко Д. О. Застосування систем штучного інтелекту для вирішення проблем пожежної безпеки. *Mechanics and mathematical methods*. 2025. № 7/1. P. 152–172. URL: <https://journals.indexcopernicus.com/api/file/viewByFileId/2397290>.

REFERENCES

1. Alpdemir, M. N. (2023). A hierarchical reinforcement learning framework for UAV path planning in tactical environments. *Turkish Journal of Science and Technology*, 18, 243–259. <https://doi.org/10.55525/tjst.1219845> [in English].

2. Bellman, R. (1954). The theory of dynamic programming. *Bulletin of the American Mathematical Society*, 60, 503–515. <https://doi.org/10.1090/S0002-9904-1954-09848-8> [in English].

3. Cheng, Y., Li, D., Wong, W. E., et al. (2022). Multi-UAV collaborative path planning using hierarchical reinforcement learning and simulated annealing. *International Journal of Performability Engineering*, 18, 463–474. <https://doi.org/10.23940/ijpe.22.07.p1.463474> [in English].

4. Dayan, P., & Hinton, G. E. (1992). Feudal reinforcement learning. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 5, 272–278. Retrieved from: papers.nips.cc/paper/1992/file/d14220ee66aee73c49038385428ec4c-Paper.pdf [in English].

5. Dietterich, T. G. (2000). Hierarchical reinforcement learning with the MAXQ value function decomposition. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 13, 227–303. <https://doi.org/10.1613/jair.639> [in English].

6. Kou, K., Yang, G., Zhang, W., et al. (2022). Autonomous navigation of UAV in dynamic unstructured environments via hierarchical reinforcement learning. International Conference on Automation, Robotics and Computer Engineering (ICARCE), 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICARCE55724.2022.10046655> [in English].

7. Ren, T., Niu, J., Dai, B., et al. (2021). Enabling efficient scheduling in large-scale UAV-assisted mobile-edge computing via hierarchical reinforcement learning. *IEEE Internet of Things Journal*, 9, 7095–7109. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3071531> [in English].

8. Sutton, R. S., Precup, D., & Singh, S. (1999). Between MDPs and semi-MDPs: A framework for temporal abstraction in reinforcement learning. *Artificial Intelligence*, 112, 181–211. [https://doi.org/10.1016/S0004-3702\(99\)00052-1](https://doi.org/10.1016/S0004-3702(99)00052-1) [in English].

9. Vezhnevets, A. S., Osindero, S., Schaul, T., et al. (2017). Feudal networks for hierarchical reinforcement learning. International Conference on Machine Learning, 3540–3549. Retrieved from: <https://proceedings.mlr.press/v70/vezhnevets17a/vezhnevets17a.pdf> [in English].

10. Zhang, Y., Mou, Z., Gao, F., et al. (2021). Hierarchical deep reinforcement learning for backscattering data collection with multiple UAVs. *IEEE Internet of Things Journal*, 8 (5), 2808–2821. Retrieved from: <https://www.scribd.com/document/902432515/Hierarchical-Deep-Reinforcement-Learning-for-Backscattering-Data-Collection-With-Multiple-UAVs> [in English].

11. Danyk, Yu. O., & Kirichenko, D. O. (2025). Zastosuvannya system shtuchnoho intelektu dlia vyirishennia problem pozhhezhnoi bezpeky [Application of artificial intelligence systems for solving fire safety problems]. *Mechanics and mathematical methods*, 7 (1), 152–172. Retrieved from: <https://journals.indexcopernicus.com/api/file/viewByFileId/2397290> [in Ukrainian].

© Д. П. Войтович, Р. Ю. Сукач

Науково-методична стаття.

Стаття надійшла до редакції 15.09.2025

Стаття прийнята 01.10.2025

Статтю опубліковано 23.12.2025



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.47.2025.05>

Д. П. Войтович, Р. Ю. Сукач

*Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
м. Львів, Україна*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2280-5585> – Д. П. Войтович

<https://orcid.org/0000-0003-4174-9213> – Р. Ю. Сукач

✉ science_ukr@ukr.net

АНАЛІЗ НЕДОЛІКІВ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Вступ. Статтю присвячено аналізу особливостей гасіння пожеж на енергетичних об'єктах в умовах воєнних дій і специфіки нормативно-правового забезпечення протипожежного захисту.

Мета дослідження – виявлення проблемних аспектів функціонування систем пожежогасіння енергетичної інфраструктури в умовах війни та визначення шляхів удосконалення нормативної бази з урахуванням міжнародного досвіду. Під час наукового дослідження використовувалися загальнонаукові методи пізнання: аналіз, синтез, порівняння, узагальнення та системний підхід.

Результати дослідження показують, що міжнародна практика протипожежного захисту енергетичних об'єктів ґрунтується на комплексному поєднанні активних і пасивних заходів. Зокрема, зроблено акцент на вивченні стандарту NFPA 850, де досліджено вимоги щодо впровадження сучасних активних систем пожежогасіння, як-от водяний туман, піна, газові установки та системи швидкого скидання тиску. Це дає змогу мінімізувати ризики вибухів і поширення вогню. Поряд із цим показано, що стандарт ІЕС 61936-1 визначає більш детальні аспекти щодо дотримання відстаней між трансформаторами, класифікації рідин, вимог до вогнестійкості стін і врахування сейсмостійкості. Досліджено, що українська нормативна база є достатньо розвиненою, містить «Інструкцію з гасіння пожеж на енергетичних об'єктах» та інші документи, які регламентують порядок дій у разі загоряння трансформаторів, кабельних тунелів і генераторів. Значна увага приділяється безпеці персоналу, застосуванню діелектричних засобів захисту, а також правилам використання води, інертних газів і піни. Водночас показано, що вітчизняні норми розроблялися переважно в умовах мирного часу, через що вони не враховують сучасних викликів. Недостатньо врегульованими залишаються питання вибухостійкості стін, необхідності використання систем швидкого зниження тиску, сучасної класифікації трансформаторів та екологічних обмежень щодо застосування вогнегасячих речовин. Для забезпечення практичної цінності дослідження запропоновано конкретні напрями вдосконалення нормативної бази, а саме: запровадження вимог до систем швидкого скидання тиску; деталізація параметрів автоматичних систем пожежогасіння; установлення норм вибухостійкості протипожежних стін; введення екологічних обмежень щодо піноутворювачів; інтеграція пожежної автоматики із системами керування енергетичними об'єктами й уточнення класифікації трансформаторів за типом діелектричних рідин.

Ключові слова: енергетичні об'єкти, пожежогасіння, війна, нормативна база, захисні споруди.

D. P. Voytovych, R. Yu. Sukach

Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine

ANALYSIS OF SHORTCOMINGS IN THE FIRE PROTECTION OF CRITICAL INFRASTRUCTURE FACILITIES

Introduction. The article focuses on analyzing the peculiarities of fire extinguishing at energy facilities under wartime conditions and the specifics of regulatory and legal support for fire protection.

The purpose of the study is to identify problematic aspects in the functioning of fire extinguishing systems within the energy infrastructure during war and to determine ways of improving the regulatory framework with consideration of international experience.

The research employed general scientific methods of cognition: analysis, synthesis, comparison, generalization, and a systematic approach. The findings demonstrate that international fire protection practices for energy facilities are based on a comprehensive combination of active and passive measures. Particular attention is given to the NFPA 850 standard, which addresses requirements for implementing modern active fire suppression systems, such as water mist, foam, gas installations, and rapid pressure relief systems. These measures help minimize the risks of explosions and fire spread. At the same time, IEC 61936-1 specifies more detailed aspects related to transformer spacing, fluid classification, fire resistance requirements for walls, and seismic resistance considerations. The study shows that the Ukrainian regulatory framework is relatively developed and includes the “Instruction on extinguishing fires at energy facilities” and other documents that regulate procedures in case of transformer, cable tunnel, and generator fires. Significant attention is devoted to personnel safety, the use of dielectric protective equipment, and the rules for applying water, inert gases, and foam. However, it is demonstrated that domestic standards were mainly developed in peacetime and therefore do not address current challenges. Issues such as explosion resistance of walls, the necessity of rapid pressure reduction systems, modern transformer classification, and environmental restrictions on fire suppression agents remain insufficiently regulated. For the study’s practical value, several specific directions for improving the regulatory framework have been proposed, namely: introducing requirements for rapid pressure-relief systems; specifying the parameters of automatic fire-extinguishing systems; establishing explosion-resistance standards for fire barriers; implementing environmental restrictions on foam-forming agents; integrating fire-protection automation with control systems of energy facilities; and refining the classification of transformers based on the type of dielectric liquids.

Key words: energy facilities, fire extinguishing, war, regulatory framework, protective structures.

Постановка проблеми. В умовах воєнної агресії проти України енергетична інфраструктура стала однією з головних цілей масованих атак противника. Руйнування трансформаторних парків, розподільчих підстанцій та інших елементів енергосистеми не лише загрожує стабільності енергопостачання, але й створює критичні ризики для національної безпеки. У відповідь на ці виклики розпочалося широке впровадження інженерних захисних споруд, які підвищують стійкість енергетичних об’єктів до ураження, але водночас змінюють умови організації та проведення тактики їх гасіння. Таким чином, виникає потреба в комплексному науковому аналізі поєднання заходів фізичного захисту та систем протипожежної безпеки.

Особливу актуальність дослідження визначає необхідність інтеграції міжнародних стандартів та практик із національними нормативними документами. Міжнародні регламенти (зокрема, NFPA 850 та IEC 61936-1) пропонують систематизовані підходи до організації протипожежного захисту, які базуються на багаторівневих технічних і організаційних рішеннях. Водночас українська нормативна база розроблялася в мирний час і не враховує специфіки воєнного середовища, де додаткові інженерні укриття можуть ускладнювати доступ пожежно-рятувальних підрозділів і роботу стаціонарних систем. Це зумовлює потребу в порівняльному аналізі та формуванні рекомендацій щодо вдосконалення існуючих підходів.

Аналіз останніх наукових досліджень і публікацій. Питання особливостей гасіння енергетичних об’єктів в умовах війни є достатньо

дослідженим як у вітчизняній, так і в зарубіжній науковій літературі, адже проблематика безпеки критичної інфраструктури набула особливої актуальності у зв’язку з воєнними діями проти України. Значний внесок у розвиток теми зробили вітчизняні дослідники, серед яких варто відзначити В. М. Баланюка, В. С. Мирошкіна, Н. І. Гузар, О. І. Гарасим’юка та Ю. О. Копистинського [1], які запропонували підвищення ефективності гасіння пожеж на відкритих електричних підстанціях шляхом використання вогнегасних аерозолів, що є особливо важливим в умовах дефіциту ресурсів під час воєнного стану. Нормативні аспекти відображені в методичних рекомендаціях Генерального штабу Збройних Сил України [2] та інструкції Міністерства юстиції України [3], де визначено технічні й організаційні засади ліквідації пожеж на енергетичних об’єктах.

Серед зарубіжних авторів важливими є праці Р. Anakhov [5], який аналізує способи захисту критичної енергетичної інфраструктури від терористичних і воєнних загроз, та М. Betuš, М. Konček, М. Šofranko, J. Čambal і М. Ondov [6], які дослідили методи гасіння пожеж на об’єктах із високою напругою, підкреслюючи потребу в адаптації технологій до екстремальних умов. Міжнародні стандарти також відіграють значну роль у формуванні сучасної системи пожежної безпеки: IEC 61936-1 [7] та NFPA 850 [8] встановлюють загальні вимоги і практичні рекомендації для високовольтних електроустановок та електростанцій.

Особливу увагу заслуговує публікація J. Przybylak [9], яка висвітлює ризики експлуатації атомних електростанцій у зонах бойових дій, та

дослідження М. Schmitt [10], де розглянуто правові аспекти атак на енергетичну інфраструктуру в контексті міжнародного гуманітарного права. Додатково праця О. Василюка, Е. Сімонова, А. Давидової, В. Колодежної та Я. Спінової [11] висвітлює екологічні наслідки руйнування енергетичних об'єктів, що прямо впливають на безпечність проведення аварійно-рятувальних робіт.

Попри достатню кількість літератури із цієї теми, відчувається нестача систематизованого матеріалу щодо особливостей гасіння пожеж на енергетичних об'єктах у воєнних умовах, а тому з використанням різних методів наукового пізнання було проаналізовано, згруповано й узагальнено інформацію і подано її у світлі теми дослідження.

Методологія та методи. Методологічна основа дослідження ґрунтується на поєднанні нормативно-аналітичного підходу, порівняльного аналізу міжнародних (NFPA 850, IEC 61936-1) та національних регламентів [1–8], а також застосуванні базових інженерних моделей оцінювання пожежних ризиків для енергетичних об'єктів. У роботі використано методи кількісного порівняння характеристик пожежної безпеки, зокрема розрахунок радіаційного теплового потоку, аналіз впливу геометрії інженерних укриттів на час доступності до трансформаторів та оцінювання відповідності меж вогнестійкості й мінімальних протипожежних відстаней різних нормативних систем. Для обґрунтування висновків проведено систематизацію вимог нормативних документів, моделювання критичних сценаріїв пожеж та їхнього впливу на можливості гасіння в умовах бойових дій. Такий комплексний підхід забезпечив інтеграцію теоретичного аналізу, інженерних розрахунків та нормативної оцінки з метою виявлення структурних прогалин і формування практичних рекомендацій щодо адаптації протипожежного захисту енергетичних об'єктів у воєнний період.

Мета статті полягає у стислому аналізі міжнародних і національних нормативів пожежогасіння енергетичних об'єктів із врахуванням сучасних умов війни та визначенні напрямів їх удосконалення. У межах дослідження вирішуються завдання: вивчення міжнародної практики протипожежного захисту (NFPA 850, IEC 61936-1), оцінка української нормативної бази з виокремленням її сильних сторін і прогалин, а також встановлення специфіки пожежогасіння в умовах воєнних загроз з окресленням потреби в адаптації чинних інструкцій до нових реалій.

Виклад основного матеріалу. В умовах війни об'єкти енергетичної інфраструктури України стали найбільш уразливими цілями, на які здійснюються систематичні та масовані атаки з боку

противника. Руйнування трансформаторних парків, розподільчих підстанцій та інших елементів енергосистеми безпосередньо загрожує стабільності роботи енергетичного сектору та національній безпеці загалом.

У відповідь на цю загрозу Міністерством та Генеральним штабом Збройних Сил України були розроблені й оприлюднені Методичні рекомендації з інженерного захисту будівель, споруд та дахів об'єктів критичної інфраструктури [2]. Цей документ став основою для широкого впровадження інженерних захисних споруд на всіх ключових енергетичних об'єктах. У практиці вже застосовуються різноманітні конструктивні рішення, класифіковані та подані в табл. 1.

Разом із тим постає важливе питання: попри наявність багаторівневого інженерного захисту, прямі влучання боєприпасів залишаються неминучими, а отже, виникають пожежі, які потребують негайної локалізації та ліквідації. У цій ситуації ключовим є з'ясування, наскільки різні типи захисних споруд сприяють або, навпаки, ускладнюють процес гасіння пожеж. Доступ до критичного обладнання (трансформаторів, вимикачів, шинних систем) може бути обмежений, що потребує адаптації як стаціонарних, так і мобільних систем пожежогасіння.

Для того щоб оцінити доцільність та ефективність впроваджених інженерних рішень, необхідним є аналіз нормативних джерел, які визначають вимоги до засобів гасіння, дистанцій доступу та технічних заходів безпеки [3; 8; 7]. Саме із цього починається дослідження проблеми – вивчення міжнародних і національних стандартів, що визначають принципи організації систем протипожежного захисту в умовах підвищеної воєнної небезпеки.

Аналіз міжнародної практики (табл. 2) організації протипожежного захисту енергетичних об'єктів демонструє наявність усталених стандартів, що регламентують як технічні, так і організаційні заходи пожежної безпеки. Серед них особливе значення мають NFPA 850 (США) та IEC 61936-1 (ЄС), які визначають підходи до безпечної експлуатації трансформаторів та інших високовольтних установок [8; 7].

У документі NFPA 850: Recommended Practice for Fire Protection for Electric Generating Plants and High Voltage Direct Current Converter Stations (2020) визначено комплексну систему протипожежного захисту електрогенеруючих станцій і підстанцій. Основна концепція цього стандарту полягає у мінімізації наслідків аварій і запобіганні поширенню пожежі від одного трансформатора на інші елементи інфраструктури чи будівлі.

Види захисних споруд для енергетичних об'єктів

№	Тип захисної споруди	Короткий опис конструкції	Пожежна безпека та можливості гасіння
1	Перешкоди з рухомого складу / контейнерів	Списані вагони або контейнери, розташовані в 1–2 яруси, заповнені піском / ґрунтом; додатково біг-беги зверху	Складність доступу до КЕ. Для гасіння – залишати проходи (0,7 м). Застосовувати стаціонарні системи пожежогасіння (піна / вода / газ) або подавати воду ззовні через спеціальні отвори
2	Перешкоди з біг-бегів / габйонів / плит	Стіни з бетонних плит (зварюються) або насипи з біг-бегів і габйонів у 2–3 яруси, вище КЕ	Добре локалізують вибух і уламки. Для гасіння потрібні стаціонарні трубопроводи з насадками або переносні стволи через вузькі проходи. Внутрішні стіни можна викласти мішками з піском для зниження уламків
3	«Саркофаг» (метал + ґрунт)	Каркас зі сталевих колон і ферм, обшитий металевими листами, з проміжками, засипаними ґрунтом; дах із плит і канатних елементів	Максимальна перешкода для доступу. Пожежогасіння організовують через стаціонарні системи пожежогасіння всередині укриття (спринклери, газове). Потрібні люки / проходи для подачі води / піни
4	Ланцюгові екрани	Підвішені на опорах ЛЕП ланцюги / троси, які збивають БПЛА / ракети	На пожежогасіння не впливають, доступ відкритий. Використовуються як бар'єр на підходах
5	Пасивний захист зі сталевих опор і сітки	Високі стійки з натягнутою металевою та полімерною сіткою (20–100 м). Змінює траєкторію засобів ураження	Доступ до КЕ зберігається. Гасіння можливе звичайними методами (водяні стволи, системи піноутворення). Обмеження – складність доступу техніки під сіткою
6	Просторові каркаси з сітками	Металеві / дерев'яні каркаси, перекриті дротовою чи геотекстильною сіткою; висота $\geq 2,5$ м над дахом споруди	Пожежогасіння можливе, але ускладнене. Потрібно передбачити спеціальні отвори для прокладання рукавів і доступу стволів
7	Кутові відбивачі (металеві «кути»)	Металеві тригранні відбивачі для спотворення РЛС-картини (на землі, на воді)	Не впливають на пожежогасіння, оскільки не перекривають доступ до обладнання
8	Ґрунтові вали	Насипи піску / ґрунту (1:1), ущільнені котками; висота більша за КЕ. Можливе нарощування контейнерами чи біг-бегами	Можуть ускладнювати доступ, але дають добру ізоляцію. Для гасіння – стаціонарні системи пожежогасіння або прокладання спеціальних каналів / люків у валу для подачі води

Примітка: систематизовано авторами на основі [2].

Акцент робиться на активних системах пожежогасіння. Для трансформаторів дозволяється використання води, піни, водяного туману, інертних газів та навіть аерозольних систем. Особливе місце посідають технології швидкого скидання тиску (fast depressurization systems), які реагують за мілісекунди та запобігають вибуховому руйнуванню бака трансформатора. Завдяки цьому значно знижується ризик масштабної пожежі й забезпечується збереження дорогого обладнання. У низці випадків також передбачається можливість введення спеціальних речовин (наприклад, вуглецевих матеріалів), що пригнічують процес горіння.

Документ встановлює жорсткі вимоги до розташування трансформаторів. Маслонаповнені трансформатори повинні мати протипожежні

відстані від кількох метрів (для невеликих установок) до 15 м (для великих агрегатів). Якщо таке розміщення неможливе, передбачається встановлення протипожежних стін (firewalls) з межею вогнестійкості не менше ніж 2 години. Такі стіни повинні перевищувати габарити трансформатора і виступати мінімум на 0,6 м за його межі. Крім того, обов'язковими є системи уловлювання масла (oil containment systems), що перешкоджають розтіканню горючої рідини та її займання на суміжних ділянках.

Окрему увагу NFPA 850 приділяє альтернативним діелектричним рідинам, які є негорючими. Використання таких рідин значно знижує імовірність займання, що в поєднанні з активними системами захисту підвищує надійність об'єкта. Важливим компонентом є також організаційні

Особливості пожежогасіння енергетичних об'єктів згідно з NFPA 850

Аспект	Особливості
Типи систем пожежогасіння	Використовуються вода, піна, водяний туман, інертні гази; рекомендовані compressed air foam systems
Системи швидкого скидання тиску (Fast Depressurization)	Механічна система, що спрацьовує за мілісекунди після аварії, знижує тиск у трансформаторі та запобігає вибуху
Аерозольні системи	Застосовуються в невеликих приміщеннях як допоміжний засіб гасіння
Активне введення вуглецю (Carbon injection)	Введення вуглецевих матеріалів для інгібування процесу горіння в певних випадках
Протипожежні відстані (масляні трансформатори)	Відстані залежать від об'єму масла: < 500 гал – мінімальні вимоги; 500–18 925 гал – 7,6 м; > 18 925 гал – 15 м
Протипожежні стіни (Firewall)	Мають мати вогнестійкість не менше ніж 2 години, бути вищими за трансформатор і виступати мінімум на 0,6 м за його межі
Системи уловлювання масла (Oil containment)	Обов'язкові уловлювачі для запобігання розтіканню масла та його займання на сусідніх об'єктах
Використання негорючих діелектричних рідин	Рекомендоване застосування нефламованих рідин для зменшення ризику загоряння
Захист від вибухів і уламків	Firewall має витримувати вибухи вводів чи баків; можливе застосування додаткових захисних щитів
Організаційні заходи	Програма управління пожежними ризиками, навчання персоналу, інтеграція SCADA – системи для моніторингу пожеж

Примітка: систематизовано авторами на основі [8].

заходи: розробка програм управління пожежними ризиками, регулярна підготовка персоналу, наявність інтегрованих систем моніторингу та сигналізації (SCADA).

Міжнародний стандарт IEC 61936-1: Power installations exceeding 1 kV AC – Part 1: General (2021) відрізняється від NFPA 850 іншим акцентом: у центрі уваги перебуває пасивний протипожежний захист. Його вимоги насамперед стосуються правил проєктування, розташування та класифікації трансформаторів за типом діелектричних рідин (масляні, менш горючі, сухі) [6].

Документ чітко визначає мінімальні відстані між трансформаторами залежно від їхньої конструкції та об'єму рідини: від 0,9 м для сухих трансформаторів до 15 м для великих маслonaповнених. У випадках, коли забезпечити такі відстані неможливо, обов'язковим є встановлення протипожежних стін із межею вогнестійкості EI 60 (60 хвилин) або навіть REI 90 (90 хвилин). Таким чином, IEC формує більш детальну систему класифікації та нормування, яка дає змогу гнучко враховувати реальні умови експлуатації (табл. 3).

У міжнародних стандартах, зокрема IEC 61936-1, активні системи пожежогасіння згадуються лише опосередковано, переважно як засіб зменшення протипожежних відстаней між трансформаторами, без деталізації їхньої технологічної специфіки. Натомість IEC приділяє значну

увагу питанням сейсмостійкості та впливу вібрацій на енергетичні установки, що майже не розглянуто в NFPA 850. Узагальнення міжнародної практики засвідчує наявність систематизованих правил протипожежного захисту енергетичних об'єктів, орієнтованих на багаторівневий підхід і забезпечення працездатності обладнання за умов аварій.

Слід наголосити, що стандарти NFPA 850 та IEC 61936-1 розроблялися в мирний час і не враховують ризиків, властивих воєнному середовищу. В українських умовах до стандартних вимог додається необхідність реалізації захисних укриттів і споруд, які підвищують стійкість до атак, але водночас можуть ускладнювати доступ пожежно-рятувальних підрозділів і роботу стаціонарних систем пожежогасіння. Попри це, обидва документи залишаються базовими орієнтирами для проєктування й експлуатації енергетичних об'єктів [8; 7].

Українське нормативне регулювання ґрунтується на Інструкції з гасіння пожеж на енергетичних об'єктах України, затвердженій Мін'юстом [3]. Вона визначає загальні принципи та спеціалізовані алгоритми дій під час пожеж на електроустановках, що перебувають під напругою. Пріоритетом є безпека персоналу та рятувальників: застосовуються засоби гасіння, які мінімізують ризик ураження струмом; використання розпиленої води дозволяється лише з дотриманням

Відмінності NFPA 850 та ІЕС 61936-1

Аспект	NFPA 850	ІЕС 61936-1
Активні системи гасіння	Докладний опис (вода, піна, туман, інертні гази, аерозолі, fast depressurization)	Лише згадка: дають можливість зменшити відстані, без деталізації
Вогнестійкість firewall	Мінімум 2 години	EI 60 (60 хв), у деяких випадках REI 90 (90 хв)
Вимоги до відстаней	Єдині норми для маслонаповнених трансформаторів (до 15 м залежно від об'єму)	Чітка таблиця: масляні (O), менш горючі (K), сухі (A) з різними значеннями від 0,9 до 15 м
Технологія зниження тиску	Fast depressurization systems – обов'язкові для високої надійності	Відсутня згадка
Класифікація трансформаторів	Загальна рекомендація використовувати негорючі рідини	Окрема класифікація: O, K, A з урахуванням об'єму та рівня захисту
Сейсмостійкість та вібрації	Майже не розглядається	Спеціальний розділ з урахуванням сейсмічних навантажень і вібрацій

Примітка: систематизовано авторами на основі джерел [7; 8].

нормативної дистанції залежно від класу напруги; ручні стволи та насоси підлягають заземленню. Піна заборонена через електропровідність [1]. Усі роботи здійснюються в діелектричних засобах захисту.

Для кабельних споруд головним завданням є запобігання поширенню вогню вздовж трас. У разі неспрацювання автоматики системи пожежогасіння запускаються дистанційно або вручну; застосовуються водяні завіси або повне заповнення приміщення повітряно-механічною піною після перевірки відсутності персоналу [6].

У разі пожежі в генераторах і компенсаторах передбачається аварійне відключення з подальшим використанням стаціонарної водяної системи (для машин із повітряним охолодженням) або інертних газів – CO₂, N₂ – для витіснення водню й усунення вибухонебезпечності (для машин із водневим охолодженням) [3]. Додатково здійснюється охолодження металевих ферм перекриття. У разі аварій маслосистем здійснюється аварійний злив у резервуари або вмикаються системи зрошення [1].

Для трансформаторів і маслонаповнених реакторів алгоритм передбачає негайне відключення та заземлення, після чого допускається застосування розпиленої води або піни. У разі внутрішнього пошкодження з викидом масла засоби гасіння подаються всередину бака через доступні отвори. Забороняється зливання масла. У великих пожежах пріоритетом стає охолодження конструкцій і сусіднього обладнання [6].

Інструкція також вимагає створення оперативних карток пожежогасіння для кожного енергетичного об'єкта – з текстовими та графічними схемами будівель, обладнання, вододжерел,

маршрутів руху техніки й алгоритмами дій для різних типів обладнання [3].

В умовах війни додаткове значення має документ ДСНС – Рекомендації щодо виконання завдань у населених пунктах під час збройної агресії (наказ від 02.04.2024 № 375) [4]. Він визначає вимоги до організації служби та безпеки особового складу під час бойових дій: застосування засобів бронезахисту, оснащення рятувальників індивідуальними аптечками та турнікетами, забезпечення пожежної техніки медичними укладками та ношами, організація взаємодії з військовими структурами, використання безпечних маршрутів та підтримання зв'язку навіть за умов РЕБ [4].

Основні положення документа систематизовано в таблиці 4.

Таким чином, у контексті гасіння пожеж на енергетичних об'єктах ці положення мають принципове значення: додатковий бронезахист і спеціальні процедури роботи забезпечують зниження ризиків для особового складу в умовах масованих атак і повторних обстрілів.

Отже, українська нормативна база у сфері пожежогасіння на енергетичних об'єктах є досить детальною і врегульованою. Вона встановлює як технічні вимоги, так і організаційні процедури, орієнтуючись на гарантію безпеки персоналу й мінімізацію пошкоджень обладнання. Водночас ці інструкції створювалися в мирний час і не враховували специфіки застосування інженерних захисних споруд, як-от залізобетонні саркофаги, габіони, ґрунтові вали чи контейнери, що нині широко використовуються для захисту трансформаторів та підстанцій від повітряних атак [2; 5]. Сучасна практика показує, що додаткові споруди, з одного боку, підвищують стійкість до ураження, а з іншого – можуть ускладнювати доступ

Основні вимоги наказу ДСНС № 375 (02.04.2024) щодо дій підрозділів у воєнний час

№	Аспект	Ключові вимоги	Значення для гасіння пожеж на енергетичних об'єктах
1	Засоби індивідуального захисту	Обов'язкове використання бронежилетів, бронешоломів; кожен рятувальник має бути забезпечений аптечкою з турнікетом	Зниження ризику ураження за повторних обстрілів під час гасіння
2	Медичне забезпечення	Пожежно-рятувальні автомобілі комплектуються медичними укладками та ношами	Можливість оперативного надання допомоги пораненим у зоні бойових дій
3	Укриття та безпека	Наявність укриттів у місцях дислокації; відпрацьовані маршрути переміщення; сигнал «Увага, небезпека» для негайного відходу	Забезпечення збереження особового складу навіть під час повторних атак
4	Взаємодія з військовими	Постійна координація з ЗСУ, Нацгвардією, поліцією, штабами ТрО; супровід підрозділів у небезпечних районах	Гарантування безпечного доступу до енергетичних об'єктів, що перебувають під загрозою
5	Пересування	Використання лише безпечних маршрутів (основного та запасного), рух колон із дистанцією 100–150 м, мінімізація зупинок	Зменшення ризику ураження техніки й персоналу під час виїзду до місця пожежі
6	Зв'язок і моніторинг	Використання радіо, супутникового зв'язку («Старлінк»), дублювання ПЗЧ у захисних спорудах, чергування моніторингу повітряної обстановки	Безперервне управління підрозділами та своєчасне оповіщення про нові загрози
7	Організація служби	Чергування вахтовим методом у прифронтових районах; ротація особового складу за тривалих робіт; психологічна підтримка	Підтримання працездатності та моральної стійкості рятувальників
8	Взаємодія з населенням	Виконання завдань з евакуації, життєзабезпечення та гуманітарної допомоги в умовах обстрілів	Підвищення довіри до сил цивільного захисту та стабілізація ситуації

Примітка: систематизовано авторами на основі [4].

пожежно-рятувальних розрахунків і роботу стаціонарних систем пожежогасіння.

Проаналізувавши зарубіжну літературу, міжнародні стандарти та чинні нормативні акти України, можна виокремити ключові прогалини у вітчизняному законодавстві у сфері пожежогасіння енергетичних об'єктів, які доцільно адаптувати з урахуванням напрацьованої міжнародної практики.

1) відсутність вимог до систем швидкого скидання тиску. В українських нормах не прописано, що трансформатори повинні мати механізми, які миттєво знижують тиск усередині бака в разі аварії. У міжнародній практиці (наприклад, у США) така технологія визнається одним із ключових способів запобігання вибухам;

2) недостатня деталізація автоматичних систем пожежогасіння. Європейські та українські стандарти лише зазначають, що застосування автоматичних систем може сприяти скороченню відстані між трансформаторами. Але не пояснюють, які саме це мають бути системи: водяний туман, піна, газові установки чи інші, і які параметри вони повинні мати. У NFPA це описано детально;

3) немає норм щодо стійкості протипожежних стін до вибуху. Українські документи вимагають

лише певну вогнестійкість стін (наприклад, 60 або 90 хвилин). Але не враховується, що в разі аварії можливий вибух, який може зруйнувати перегородку. У NFPA акцент робиться також на здатності стін витримувати вибухові навантаження;

4) відсутність екологічних вимог до засобів пожежогасіння. У нас не визначено, які речовини можуть бути використані для гасіння, щоб вони не шкодили довкіллю. Наприклад, у світі зараз активно обговорюють заборону піноутворювачів із токсичними сполуками (так звані PFAS), а в українських документах цього немає;

5) недостатня увага до інтеграції пожежної автоматики із системами управління станцією. Українська інструкція з гасіння пожеж описує порядок дій людей, але не встановлює вимог до того, як автоматичні системи виявлення та гасіння мають бути підключені до загальної системи керування станцією чи до диспетчерських центрів;

6) відсутність сучасної класифікації трансформаторів за типом рідини. У міжнародних стандартах чітко розділяють трансформатори: з мінеральною оливою, з менш горючими рідинами та сухі. Від цього залежать протипожежні вимоги. Українські норми відтворюють цю систему лише

частково й не завжди дають достатньо точні орієнтири для проєктантів.

З метою здійснення емпіричного дослідження виконано низку розрахункових оцінок, що дають змогу визначити вплив конструктивних захисних споруд на параметри пожежогасіння та зіставити вимоги міжнародних і національних стандартів.

1. Оцінювання радіаційного теплового потоку під час пожежі трансформатора. Розрахунок проведено для типового маслонаповненого трансформатора об'ємом 10 000 л. Згідно з методикою NFPA 850, тепловий потік q_r на відстані R визначається:

$$Q_r = x \cdot Q / 4\pi R^2,$$

де

$X = 0,35$ – частка теплового випромінювання;

$Q = 3,8 \cdot 10^7$ кДж – теплота повного згоряння оливи.

Для відстані 7,6 м (норма NFPA для трансформаторів середнього об'єму): $q_r = 18,3$ кВт/м².

Для відстані 5 м (типова українська практика розміщення): $q_r = 42,2$ кВт/м².

Таким чином, зменшення відстані на 2,6 м збільшує теплове навантаження на 130 %, що суттєво ускладнює гасіння та потребує захисних стін або водяного туману (табл. 6).

2. Моделювання впливу інженерних укриттів на час доступу до трансформатора. Використано спрощену модель доступності:

$$t_{acc} = t_0 + \Delta t_h + \Delta t_c,$$

де

t_0 – базовий час доступу (95–120 с для підстанцій 110–330 кВ);

Δt_h – додатковий час через висоту укриття;

Δt_c – додатковий час через конфігурацію проходів.

Для типових споруд час доступності становитиме (табл. 5).

Отже, у середньому інженерні укриття збільшують час доступу на 41–92 %.

3. Розрахунок мінімальної необхідної інтенсивності водяного гасіння. Відповідно до NFPA 850, мінімальна інтенсивність подачі води: $I = 0,25$ л/(см²).

Для трансформатора з площею охоплення полум'ям

$$A = 28\text{ м}^2,$$

$$Q = I \cdot A = 7,0 \text{ л/с}.$$

Фактичні дані українських підрозділів ДСНС на енергетичних об'єктах показують, що реальна доступна подача становить 4,5–5,5 л/с (через обмеження гідрантів та рукавних ліній).

Отже, дефіцит водяної подачі становить 22–36 %, що пояснює підвищені ризики повторного займання.

4. Порівняння меж вогнестійкості протипожежних стін. Використано формальне зіставлення норм:

– NFPA 850: ≥ 120 хв;

– ІЕС 61936-1: EI 60 або REI 90 хв;

– українські норми: 60 хв (типово), інколи 90.

Розрахуємо коефіцієнт відповідності:

$$k = REI_{UA} / REI_{MFPA}.$$

Тоді для України за типової межі вогнестійкості 60 хв отримаємо значення $k = 60 / 120 = 0,50$, тобто українські протипожежні перегородки забезпечують лише половину рівня стійкості, передбаченого вимогами NFPA 850.

Мінімальна вимога ІЕС (EI 60) також дає $k = 0,50$, оскільки вона характеризується тією самою межею вогнестійкості – 60 хв. Проте важливо зазначити, що ІЕС допускає використання і вищого класу REI 90, що приводить до значення $k = 90 / 120 = 0,75$.

Таким чином, хоча базовий рівень ІЕС і українських норм формально збігається, міжнародний стандарт передбачає можливість застосування значно стійкіших перегородок. У підсумку українська практика у більшості випадків відповідає лише 50 % вимог NFPA щодо протипожежної стійкості, тоді як ІЕС – залежно від класу стіни – від 50 до 75 %. Це означає, що українські перегородки мають нижчу здатність протидіяти тепловому впливу та вибуховому тиску, що підвищує ризик прориву полум'я у разі аварійного пошкодження трансформатора.

5. Мінімальні відстані: чисельна різниця між нормами. Для оцінювання відповідності українських норм міжнародним практикам було

Таблиця 5

Визначення часу доступності для типових споруд

Тип укриття	Висота, м	Δt_h , с	Δt_c , с	t_{access} , с
Без укриття	0	0	0	105
Габіони у 2 яруси	2,2	+18	+25	148
Контейнери у 2 яруси	2,6	+27	+34	166
З/б «саркофаг»	3,0	+42	+55	202

проведено зіставлення мінімальних протипожежних відстаней між маслonaповненими трансформаторами об'ємом 10 000 л згідно з трьома нормативними системами: національною, IEC та NFPA. Результати розрахунків зведено в таблицю 6.

Як видно з табл. 6, українські вимоги до ізоляційних відстаней є найменшими серед трьох систем і на 40–52 % поступаються міжнародним нормам. Для інтерпретації цієї різниці важливо врахувати, що тепловий потік від пожежі

Таблиця 6

Зведений розрахунок мінімальних відстаней

Норматив	Відстань для масла 10 000 л	Різниця порівняно з UA
Україна	5 м	—
IEC	7 м	+40 %
NFPA	7,6 м	+52 %

трансформатора спадає пропорційно до квадрата відстані. Це означає, що навіть відносно незначне зменшення відстані призводить до суттєвого зростання теплового навантаження на сусідні елементи. Використовуючи модель оцінювання теплового випромінювання, можна визначити, що зменшення відстані з 7,6 м (рекомендація NFPA) до 5 м (поширена українська практика) збільшує величину теплового потоку, який діє на сусідній трансформатор або конструкцію, приблизно на 130 %. Таке зростання теплового навантаження здатне не лише прискорити нагрівання обладнання, але й спричинити його займистість або руйнування ізоляції, що істотно підвищує ризик перекидання вогню та розвитку масштабної аварії.

Слід також враховувати, що в міжнародних стандартах збільшені відстані використовуються не лише для зменшення радіаційного теплового впливу, але й для забезпечення коридорів доступу для пожежно-рятувальних підрозділів, можливості роботи мобільних засобів гасіння та створення додаткових зон безпеки для персоналу. У випадку України мінімально допустима відстань 5 метрів у поєднанні з інженерними укриттями, які активно впроваджуються під час війни, може створювати значні труднощі для організації оперативних дій та знижувати ефективність гасіння.

Таким чином, ключовим завданням сьогодні є адаптація нормативних інструкцій до реалій війни: потрібно інтегрувати вимоги до проектування захисних споруд із правилами пожежної безпеки, щоб досягти балансу між захищеністю обладнання та можливістю ефективного гасіння пожеж. Це дасть змогу забезпечити цілісність енергетичної інфраструктури й відповідність усім вимогам безпеки навіть в умовах воєнних загроз.

Висновки. Узагальнюючи результати аналізу, можна зробити такі висновки. Міжнародна

практика протипожежного захисту енергетичних об'єктів ґрунтується на комплексному поєднанні активних і пасивних заходів. Зокрема, стандарт NFPA 850 робить акцент на впровадженні сучасних активних систем (водяний туман, піна, газові установки, системи швидкого скидання тиску), що мінімізують ризики вибухів і поширення пожеж. Натомість IEC 61936-1 деталізує вимоги до відстаней між трансформаторами, класифікації рідин, вогнестійкості стін і враховує фактори сейсмостійкості. Обидва документи формують багаторівневу систему протипожежного захисту, яка дає можливість зберігати працездатність об'єктів навіть у кризових умовах.

Українська нормативна база також є досить розвиненою: «Інструкція з гасіння пожеж на енергетичних об'єктах» та інші акти регламентують алгоритми дій у разі пожеж на трансформаторах, кабельних тунелях, генераторах. Значна увага приділяється безпеці персоналу, використанню діелектричних засобів захисту, правильному застосуванню води, інертних газів та піни. Водночас українські норми створювалися переважно в умовах мирного часу й не враховують специфіку сучасних загроз. Зокрема, вони не передбачають вимог до вибухостійкості стін, систем швидкого зниження тиску, сучасної класифікації трансформаторів за типом рідин чи екологічних обмежень щодо засобів пожежогасіння. Поєднання міжнародних стандартів (NFPA, IEC), українських інструкцій та наказу ДСНС № 375 створює багаторівневу систему безпеки, яка охоплює не лише технічні, а й тактичні та організаційні аспекти роботи рятувальників.

Проведені розрахункові оцінки засвідчили наявність суттєвих розбіжностей між українськими нормативними вимогами та міжнародними стандартами в частині пожежної безпеки енергетичних об'єктів. Аналіз теплового випромінювання показав, що прийнята в Україні

протипожежна відстань 5 м забезпечує на 130 % більше теплове навантаження порівняно з нормою NFPA 850, що значно ускладнює гасіння та підвищує ризики перекидання пожежі. Моделювання доступності довело, що застосування інженерних захисних споруд збільшує час доступу до трансформаторів у середньому на 41–92 %, що прямо впливає на оперативність ліквідації пожеж. Розрахунки інтенсивності подачі води засвідчили дефіцит 22–36 % від нормативного рівня NFPA 850, що створює умови для повторного займання. Порівняння меж вогнестійкості протипожежних стін показало, що українські конструкції забезпечують лише 50 % рівня стійкості, передбаченого NFPA, та від 50 до 75 % вимог ІЕС. Чисельний аналіз протипожежних відстаней підтвердив, що українські вимоги на 40–52 % нижчі за міжнародні аналоги, що підвищує теплові й оперативні ризики під час гасіння. У сукупності ці результати демонструють, що чинні українські норми та фактичні практики експлуатації трансформаторних парків потребують системного оновлення з урахуванням міжнародних рекомендацій і реалій воєнного середовища.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Баланиук В. М., Мирошкін В. С., Гузар Н. І., Гарасим'юк О. І., Копистинський Ю. О. Підвищення ефективності гасіння пожеж на відкритих електричних підстанціях шляхом використання вогнегасних аерозолів. *Fire Safety*. 2023. № 43. DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.43.2023.02> URL: <https://sci.ldubgd.edu.ua/handle/123456789/13108>.
2. Методичні рекомендації з інженерного захисту будівель, споруд та дахів об'єктів критичної інфраструктури України. Заступник начальника Генерального штабу Збройних Сил України. URL: https://rada.info/upload/users_files/04378089/c38963081c5ea02a9b98059f26fc23a8.pdf.
3. Про затвердження Інструкції з гасіння пожеж на енергетичних об'єктах України. Міністерство юстиції України. 2012. № 13/20326. URL: <https://ips.ligazakon.net/document/re20326?an=1>.
4. Рекомендації про особливості виконання органами управління та підрозділами ДСНС завдань за призначенням у населених пунктах і на територіях під час збройної агресії : затверджено наказом ДСНС від 02.04.2024 № 375.
5. Anakhov P. Defending the Critical Energy Infrastructure Facilities from Wartime Dangers and Terrorism. SSRN, 2024. URL: <https://ssrn.com/abstract=4931237>.
6. Betuš M., Konček M., Šofranko M., Čambal J., Ondov M. Methods of extinguishing fires in objects with high voltage. *Fire*. 2023. № 6 (11), 442. URL: <https://doi.org/10.3390/fire6110442>.
7. IEC 61936-1: power installations exceeding 1 kV AC – part 1: general. International Electrotechnical Commission (IEC), 2021. URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/17311/217c2112cd97480480fca7eec0b12a53/IEC-61936-1-2010-AMD1-2014.pdf>.
8. NFPA 850: recommended practice for fire protection for electric generating plants and high voltage direct current converter stations. National Fire Protection Association (NFPA), 2020. URL: <https://link.nfpa.org/all-publications/850/2020>.
9. Przybylak J. Nuclear power plants in war zones: lessons learned from the war in Ukraine. *Security and Defence Quarterly*. 2024. № 46 (2). P. 84–103. URL: <https://doi.org/10.35467/sdq/174810>.
10. Schmitt M. Attacking power infrastructure under international humanitarian law. Lieber Institute, 2022. URL: <https://lieber.westpoint.edu/attacking-power-infrastructure-under-international-humanitarian-law/>.
11. Vasyliuk O., Simonov E., Davydova A., Kolodezhna V., Spinova Y. Журнал робочої групи з екологічних наслідків війни в Україні. UWEC Work Group, 2024. № 21. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29127.10400>.

REFERENCES

1. Balaniuk, V. M., Myroshkin, V. S., Huzar, N. I., Harasymyuk, O. I., & Kopystynskyi, Yu. O. (2023). Pidvyshchennia efektyvnosti hasinnia pozhezh na vidkrytykh elektrychnykh pidstantsiiakh shliakhom vykorystannia vohnehasnykh aerezoliv [Increasing the efficiency of fire extinguishing at open electrical substations by using fire-extinguishing aerosols]. *Fire Safety*, 43. DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.43.2023.02>. Retrieved from: <https://sci.ldubgd.edu.ua/handle/123456789/13108> [in Ukrainian].
2. Zastupnyk nachalnyka Heneralnoho shtabu Zbroinykh Syl Ukrainy (n.d.). Metodychni rekomendatsii z inzhenernoho zakhystu budivel, sporud ta dakhiv ob'ektiv krytychnoi infrastruktury Ukrainy [Methodical recommendations on engineering protection of buildings, structures and roofs of critical infrastructure objects of Ukraine]. Retrieved from: https://rada.info/upload/users_files/04378089/c38963081c5ea02a9b98059f26fc23a8.pdf [in Ukrainian].
3. Ministerstvo yustytisii Ukrainy. (2012). Pro zatverdzhennia Instruktisii z hasinnia pozhezh na enerhetichnykh ob'iektakh Ukrainy [On the approval of the Instruction on extinguishing fires at energy facilities of Ukraine]. No. 13/20326. Retrieved from: <https://ips.ligazakon.net/document/re20326?an=1> [in Ukrainian].
4. Derzhavna sluzhba z nadzvychainykh sytuatsii. (2024). Rekomendatsii pro osoblyvosti vykonання orhanamy upravlinnia ta pidrozdilamy DSNS zavdan za pryznachenniam u naselenykh punktakh i na terytoriakh pid chas zbroinoi ahresii [Recommendations on the peculiarities of the performance of tasks by management bodies and units of the State Emergency Service in settlements and territories during armed aggression]. Nakaz DSNS vid 02.04.2024 № 375 [in Ukrainian].
5. Anakhov, P. (2024). Defending the critical energy infrastructure facilities from wartime dangers

and terrorism. SSRN. Retrieved from: <https://ssrn.com/abstract=4931237> [in English].

6. Betuš, M., Konček, M., Šofranko, M., Čambal, J., & Ondov, M. (2023). Methods of extinguishing fires in objects with high voltage. *Fire*, 6 (11), 442. DOI: <https://doi.org/10.3390/fire6110442> [in English].

7. International Electrotechnical Commission (IEC). (2021). IEC 61936-1: Power installations exceeding 1 kV AC – Part 1: General. Retrieved from: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/17311/217c2112cd97480480fca7eec0b12a53/IEC-61936-1-2010-AMD1-2014.pdf> [in English].

8. National Fire Protection Association (NFPA). (2020). NFPA 850: Recommended practice for fire protection for electric generating plants and high voltage direct current converter stations. Retrieved from: <https://link.nfpa.org/all-publications/850/2020> [in English].

9. Przybylak, J. (2024). Nuclear power plants in war zones: Lessons learned from the war in Ukraine. *Security and Defence Quarterly*, 46 (2), 84–103. DOI: <https://doi.org/10.35467/sdq/174810> [in English].

10. Schmitt, M. (2022). Attacking power infrastructure under international humanitarian law. Lieber Institute. Retrieved from: <https://lieber.westpoint.edu/attacking-power-infrastructure-under-international-humanitarian-law/> [in English].

11. Vasyliuk, O., Simonov, E., Davydova, A., Kolodezhna, V., & Spinova, Y. (2024). Zhurnal robochoi hrupy z ekolohichnykh naslidkiv viiny v Ukraini [Journal of the working group on environmental consequences of the war in Ukraine]. UWEC Work Group, 21. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29127.10400> [in Ukrainian].

© Д. П. Войтович, Р. Ю. Сукач

Оглядова стаття.

Стаття надійшла до редакції 21.09.2025

Стаття прийнята 04.10.2025

Статтю опубліковано 23.12.2025

DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.47.2025.06>

І. І. Калужняк¹, А. Ф. Гаврилюк¹, Д. В. Фреюк²

¹ *Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
м. Львів, Україна*

² *Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнології
імені С. З. Гжицького, м. Львів, Україна*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8727-9950> – А. Ф. Гаврилюк

<https://orcid.org/0009-0009-1101-1403> – І. І. Калужняк

<https://orcid.org/0000-0001-7076-3431> – Д. В. Фреюк

✉ ikaluznak@ldubgd.edu.ua

ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БПЛА ДЛЯ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ

Постановка проблеми. Збільшення висотності сучасної забудови й ускладнення архітектурних конструкцій будівель створюють суттєві виклики для традиційних методів пожежогасіння. Використання автодрабин або колінчастих підіймачів часто є технічно неможливим чи небезпечним на великих висотах, що значно знижує оперативність та ефективність реагування під час ліквідації пожеж. У таких умовах необхідним є впровадження пожежних БПЛА, здатних забезпечити розвідку осередку горіння, оперативну подачу вогнегасних речовин і моніторинг динаміки пожежі, мінімізуючи ризики для рятувальників. Проте ефективність їхнього застосування залежить від технічних параметрів, зокрема від співвідношення між підйнятною силою та навантаженням. Недостатність досліджень у цій сфері зумовлює потребу в теоретичному аналізі чинників, які визначають ефективність пожежних БПЛА під час пожежогасіння на висотних об'єктах.

Мета полягає у визначенні закономірностей впливу основних параметрів – продуктивності подачі, виду вогнегасної речовини, реактивної сили на стволі й умовної висоти пожежі – на корисну підймальну силу пожежних БПЛА.

Опис матеріалу. У роботі застосовано теоретичний метод дослідження, який передбачав аналіз сучасних наукових публікацій, присвячених застосуванню пожежних БПЛА, а також проведення аналітичних розрахунків, що описують взаємозв'язки між параметрами системи подачі вогнегасних речовин і силами, які діють на БПЛА під час роботи. Отримано аналітичні залежності для розрахунку витрати, швидкості витоку, реактивної сили на стволі та сумарного зусилля, що впливає на підймальну силу. Проаналізовано вплив висоти пожежі, діаметра рукава, виду вогнегасної речовини на загальну рівновагу сил. Зокрема, встановлено, що статичне навантаження від стовпа рідини в рукаві є домінуючим чинником, тоді як реактивна сила, що виникає під час витоку, має відносно невелике значення – у межах 0,9–7,6 % за подачі води та 0,5–3 % за подачі компресійної піни. Результати розрахунків показали, що для гасіння пожежі на висоті 48 метрів із використанням рукава діаметром 19 мм і додаткового обладнання масою 0,5 кг мінімальна необхідна підймальна сила БПЛА становить 247,5 Н за подачі води та 134 Н за подачі компресійної піни. Це підтверджує доцільність використання легких вогнегасних речовин, які істотно зменшують навантаження на БПЛА і дають можливість підвищити ефективність та тривалість польоту. У процесі дослідження встановлено, що зі збільшенням висоти гасіння значно зростає вага стовпа вогнегасної речовини в рукаві, що потребує посилення тягових характеристик БПЛА або використання легших вогнегасних сумішей. Крім того, доведено, що реактивна сила, яка утворюється під час подачі рідини під тиском, зростає експоненційно зі збільшенням продуктивності, однак її вплив на загальну підймальну силу залишається незначним порівняно зі статичною складовою.

Висновки. За результатами проведеного теоретичного дослідження ключових чинників, що впливають на ефективність роботи пожежних БПЛА під час гасіння пожеж на висоті, визначено, що найбільший вплив на підймальну силу мають висота подачі та вага стовпа вогнегасної речовини. Використання компресійної піни як вогнегасної речовини зменшує навантаження на систему до 85 % порівняно

з водою, що значно підвищує ефективність БПЛА та дає змогу застосовувати їх на більших висотах. Отримані результати є основою для подальших експериментальних досліджень моделі.

Ключові слова: пожежа, безпілотні літальні апарати, гасіння пожежі, підймальна сила, пожежна безпека.

I. I. Kaluzhniak¹, A. F. Gavryliuk¹, D. V. Freiuk²

¹ Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine

² Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies, Lviv, Ukraine

JUSTIFICATION OF TECHNICAL CHARACTERISTICS OF UAVS FOR FIREFIGHTING

Problem Statement. The increasing height of modern urban development and the complexity of architectural structures pose significant challenges to traditional firefighting methods. The use of fire ladders or articulated lifts is often technically impossible or unsafe at great heights, which significantly reduces the speed and efficiency of firefighting operations. Under such conditions, the implementation of firefighting unmanned aerial vehicles (UAVs) becomes necessary, as they are capable of performing fire reconnaissance, delivering extinguishing agents, and monitoring fire dynamics while minimizing risks to rescue personnel. However, their operational effectiveness largely depends on technical parameters, particularly the ratio between the lifting force and the load created by the extinguishing system. The lack of research in this field necessitates a theoretical analysis of the factors determining the performance of UAVs during firefighting operations at high-rise structures.

Objective. The aim of this study is to determine the patterns of influence of the main parameters – delivery rate, type of extinguishing agent, reactive force at the nozzle, and fire height – on the useful lifting force of firefighting UAVs. The obtained results are intended to improve the efficiency of firefighting UAVs during high-rise building fire suppression.

Description of the Material. A theoretical research method was applied in this study, including the analysis of current scientific publications on the use of firefighting UAVs and analytical calculations describing the relationships between the parameters of the extinguishing agent delivery system and the forces acting on the UAV during operation. Analytical dependencies were derived to calculate flow rate, jet velocity, nozzle reactive force, and the total force affecting the lifting capability. The influence of fire height, hose diameter, and type of extinguishing agent on the overall force balance was analyzed. It was found that the static load caused by the liquid column in the hose is the dominant factor, while the reactive force generated by fluid ejection is relatively minor – ranging from 0.9–7.6% when using water and 0.5–3% when using compressed foam. The calculation results showed that for extinguishing a fire at a height of 48 meters, using a 19 mm hose and additional equipment weighing 0.5 kg, the minimum required lifting force of the UAV is 247.5 N when using water and 134 N when using compressed foam. This confirms the feasibility of using lightweight extinguishing agents, which significantly reduce UAV load and increase both operational efficiency and flight duration. The study also established that as firefighting height increases, the weight of the extinguishing agent column in the hose rises significantly, requiring enhanced UAV thrust characteristics or the use of lighter extinguishing mixtures. Furthermore, it was proven that the reactive force generated by pressurized fluid delivery increases exponentially with flow rate, but its impact on the overall lifting force remains relatively small compared to the static component.

Conclusions. The theoretical study of key factors affecting the performance of firefighting UAVs during high-altitude firefighting operations showed that the most significant influence on lifting force comes from the height of the operation and the weight of the extinguishing agent column. The use of compressed foam as an extinguishing medium reduces the system load by up to 85% compared to water, which significantly enhances drone efficiency and allows their use at greater heights. The obtained results form the basis for further experimental investigations of the proposed model.

Key words: fire, unmanned aerial vehicle, fire extinguishing, lifting force, fire danger.

Постановка проблеми. Зростання висотності міської забудови й ускладнення конструктивних рішень будівель створюють значні виклики для традиційних методів пожежогасіння, особливо на висотах, що не завжди уможливорює використання автодрабин і колінчастих або телескопічних підймачів. Пожежі у висотних спорудах вимагають негайного, точного й безпечного реагування, що

часто обмежено часом прибуття, розгортання, а також фізичними можливостями рятувальників. У цьому контексті безпілотні літальні апарати (БПЛА) або пожежні БПЛА можуть стати інноваційною технологією, яка здатна кардинально підвищити ефективність пожежогасіння. Вони можуть забезпечувати оперативну розвідку, моніторинг ситуації з використанням тепловізійних

камер і, що найважливіше, пряму доставку вогнегасних речовин до осередку горіння, мінімізуючи ризики для особового складу [1; 2; 3; 4].

Незважаючи на значний потенціал, упровадження пожежних БпЛА у практичну діяльність потребує глибокого наукового обґрунтування їхніх технічних характеристик, які б враховували як окреслену продуктивність подачі, так і висоту пожежі, а також вид вогнегасної речовини.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Можливості гасіння пожеж за допомогою БпЛА з різним рівнем автономності та функціональності досліджували низка науковців, що відображено в багатьох публікаціях [5]. Зокрема, у науковій роботі [6] авторами Пеня П. Ф., Рагаб А. Р., Луна М. А., Але Ісак М. С., Кампой П. представлено нову платформу БпЛА, призначену для гасіння лісових пожеж із запасом води 600 літрів та часом роботи 30 хвилин. Механізм використовує повітряний потік від двигунів для перетворення води у водяний туман. Автори Бхат Н. С., Шашідхара К. С., Дакулагі В. у роботі [7] запропонували гексакоптер, який використовується для скидання вогнегасної кулі в осередок пожежі. Ще інноваційний спосіб запропоновано дослідниками [8], що полягає у використанні вогнегасних куль, які в разі контакту з високою температурою вибухають і розповсюджують хімічні компоненти, які припиняють горіння. Науковці у праці [9] дослідили систему самоорганізованих роїв пожежних БпЛА для автономної боротьби з пожежами, основна увага зосереджена на механізмах самокоординації для досягнення оптимальної поведінки під час гасіння пожеж. Дослідники [10] запропонували систему моніторингу лісових пожеж на основі БпЛА для віддалених і важкодоступних районів для мінімізації втручання людини в зонах ризику лісових пожеж. Автори у праці [11] розробили БпЛА для пожежогасіння на відкритому повітрі. Запропонована система пожежогасіння на основі БпЛА, яка складається з квадрокоптера як платформи, системи передачі інформації для збору та скидання води, кінематичної навігаційної системи в реальному часі (RTK) та системи управління польотами для моніторингу та координації БпЛА. У запропонованій автономній структурі БпЛА спочатку знаходить оптимальний шлях (щодо відстані та споживання енергії) до осередку пожежі. Після прибуття до місця виникнення пожежі система управління польотами спрямовує БпЛА для гасіння пожежі. У публікації [12] науковці продемонстрували БпЛА довжиною близько 2 м, який може стабільно літати, використовувати струмінь води та змінювати напрямки вогнегасного струменя для точного гасіння

осередків пожежі. У роботі [13] дослідники запропонували концепцію використання БпЛА для транспортування та скидання в осередок пожежі вогнегасної кульки наповненої гелієм – інертним газом, що сприяє зниженню концентрації кисню в зоні горіння.

У роботі [14] запропонували новий підхід гасіння пожеж із використанням ансамблів різних типів БпЛА, здатних здійснювати патрулювання, моніторинг і безпосереднє гасіння за допомогою куль. Авторами [15] представлено шестироторний БпЛА, призначений для виявлення та гасіння пожеж на ранніх стадіях у висотних будівлях. У праці [16] продемонстровано БпЛА із запасом вогнегасних речовин, який після прибуття до місця пожежі орієнтується в напрямку розташування вогню та цілеспрямовано гасить полум'я.

Аналіз даних літературних джерел свідчить про те, що переважна більшість досліджень зосереджена переважно на первинному застосуванні вогнегасних засобів та оцінці їх ефективності в окремих експериментальних чи практичних умовах. Водночас питання впливу багаторазового застосування або заміни вогнезахисних матеріалів на загальну ефективність систем пожежогасіння залишається дослідженим недостатньо. Така наукова прогалина вказує на потребу в подальших дослідженнях, спрямованих на вивчення довготривалої працездатності та стабільності вогнезахисних засобів за повторних застосувань.

Мета та задачі дослідження. Мета роботи полягає у розкритті закономірностей впливу чинників (продуктивності подачі, виду вогнегасної речовини, реактивної сили на стволі, а також умовної висоти пожежі) на корисну піднімальну силу БпЛА.

Для досягнення цієї мети потрібно вирішити такі задачі: проаналізувати аналітичні залежності, що описують реактивні сили, які виникають на стволі під час виходу з нього вогнегасних речовин; навести залежність, яка б враховувала продуктивність подачі, вид вогнегасної речовини, реактивну силу на стволі, а також умовну висоту пожежі на корисну піднімальну силу БпЛА; з використанням наведеної залежності дослідити вплив зазначених чинників на корисну піднімальну силу БпЛА.

Методи дослідження. У роботі використано теоретичний метод дослідження, який передбачав проведення комплексного аналізу й узагальнення сучасних наукових праць, присвячених гасінню пожеж за допомогою БпЛА, а також можливості подачі різного роду вогнегасних речовин.

Виклад основного матеріалу. Застосування БпЛА для гасіння висотних пожеж є одним із найбільш перспективних напрямів у сучасних

системах пожежогасіння, що дає змогу оперативно транспортувати та подавати вогнегасні речовини у важкодоступні місця, мінімізуючи безпекові ризики для особового складу. Для забезпечення ефективної роботи БпЛА необхідним є розрахунок підйімальної сили як ключового

параметра, який забезпечить ефективний процес пожежогасіння. На рисунку 1 відображено принципову схему використання пожежного БпЛА під час гасіння пожежі, а також основні сили, які виникають і діють на БпЛА під час подачі вогнегасних речовин.

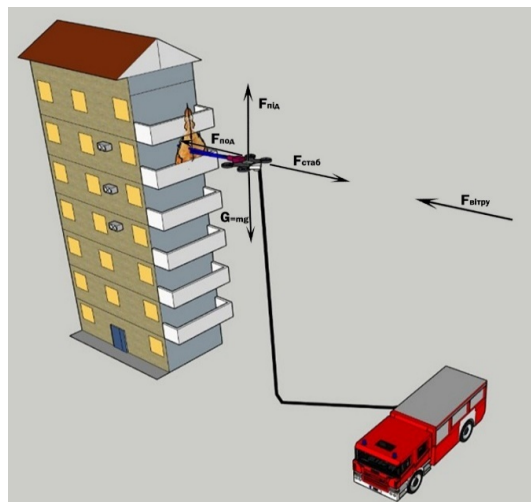


Рис. 1. Візуалізація використання БпЛА і сил, які діють під час гасіння пожежі

Під час гасіння витрата вогненосної речовини є одним із ключових параметрів, які обумовлюють успішну локалізацію та ліквідацію пожежі.

Витрату вогнегасних речовин, яка впливатиме на корисну підймальну силу Q , відображено у рівності (1).

$$Q = I \cdot S_g = 6 \cdot 10^{-4} \cdot I \cdot S_g \text{ (л/с)}, \quad (1)$$

де I – інтенсивність, л/(хв · м²);

S_g – площа гасіння, м².

Виходячи із цього, швидкість руху вогнегасної речовини можна описати рівністю (2):

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{4Q}{\pi d^2}, \quad (2)$$

де $S = \frac{\pi d^2}{4}$ – площа поперечного перерізу ствола;

d – діаметр ствола, м.

Унаслідок витоку вогнегасних речовин зі ствола утворюється реактивна сила, яка діє в протилежний бік до напрямку витоку та визначається за рівністю (3):

$$F_{nod} = \rho \cdot Q \cdot v, \quad (3)$$

де ρ – густина вогнегасної речовини, кг/м³;

Q – витрата, л/с;

v – швидкість витоку, м/с.

При цьому сила, яка протидіє корисній підймальній силі БпЛА, описується рівністю (4):

$$G = \left(\rho \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot l + m_p + k \right) \cdot g, \quad (4)$$

де m_p – маса одиниці довжини рукава, кг/м;

k – маса додаткового обладнання, кг;

g – прискорення вільного падіння 9,81, м/с²;

l – висота гасіння, м.

Таким чином, сумарне зусилля, яке виникає в системі, визначатиметься сумою G і F_{nod} :

$$F_{zac} = \sqrt{G^2 + F_{nod}^2 + 2 \cdot G \cdot F_{nod} \cdot \cos \alpha}, \quad (5)$$

де α – кут між силами F_{nod} та G , який дорівнює 90°,

однак швидкість витоку (v) залежатиме від тиску в системі (P), на який впливає кінетична енергія потоку, втрати на підйом та опір в рукаві.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot l + A, \quad (6)$$

де A – втрата внаслідок тертя.

Тоді звідси швидкість витоку можна розрахувати з використанням закону Бернуллі:

$$v = \sqrt{\frac{2(P - \rho \cdot g \cdot l - A)}{\rho}}, \quad (7)$$

де P – статичний тиск у системі, Па.

Тоді формула витрати набуде вигляду:

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2(P - \rho \cdot g \cdot l - A)}{\rho}}. \quad (8)$$

Загальна формула зусилля в системі, отримується з (5) та набуде вигляду:

$$F_{\text{заг}} = \sqrt{\left(\rho \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot l + m_p + k\right)^2 \cdot g^2 + \left(\rho \cdot Q \cdot \frac{4Q}{\pi d^2}\right)^2} \quad (9)$$

За результатами аналізу наукових праць [17; 18; 19] визначено, що діаметр рукава 19 мм використовується для подачі вогнегасних речовин за участі пожежних БпЛА. Це обґрунтовано балансом гідравлічних характеристики та пропускної здатності рукава такого діаметра.

З використанням наведених залежностей дослідимо вплив продуктивності подачі води та компресійної піни, а також умовної висоти пожежі на корисну підймальну силу БпЛА. Припустимо, що для гасіння умовної пожежі використовується БпЛА, вогнегасна речовина до якого подається по рукаву діаметром 19 мм, зовнішня пожежа виникла на висоті 48 метрів і спричинена горінням блока кондиціонера, який ініціював займання фасадного утеплювача. Маса додаткового обладнання становить (запірна арматура, ствол тощо) становить 0,5 кг, а маса одиниці довжини рукава – 0,14 кг/м [20].

Аналіз сучасних наукових праць [21; 22; 23; 24] показав, що інтенсивність гасіння такого роду пожеж для води становить 0,1–0,12 л/с м², а для компресійної піни – 0,04–0,06 л/с·м². Використання пожежного БпЛА найбільш ефективне на ранніх стадіях розвитку пожежі, себто на незначних площах, тому робимо припущення, що площа такої пожежі не перевищує 8 м². Виходячи із цього, можна дійти висновку, що продуктивність подачі не перевищуватиме 1 л/с, що

є достатнім для ліквідації пожежі за окреслених умов.

На рис. 2 наведено графічну залежність впливу продуктивності подачі від корисної підймальної сили, де 1 – залежність підймальної сили від реактивної сили, 2 – залежність підймальної сили від висоти умовної пожежі, 3 – результуюча підймальна сила.

З графіка (рис. 2) помітно, що навантаження, яке складає стовп води в рукаві, має статичний характер (лінія – 2) і не залежить від продуктивності подачі. Разом із тим зі збільшенням продуктивності подачі понад 0,4 л/с реактивна сила (лінія – 1) на стволі помітно зростає в експоненціальній залежності, що відображається на результуючій корисній підймальній силі (лінія – 3). За досягнення продуктивності подачі води 1 л/с реактивна сила на стволі становить 17,5 Н, а результуюча підймальна сила – 247,5 Н. Отже, зміна продуктивності подачі води в діапазоні 0,1–1,0 л/с (за умов проведення дослідження) впливає на підймальну силу лише на 0,9–7,6 %.

У випадку подачі як вогнегасної речовини компресійної піни (рис. 3) спостерігається аналогічна залежність, однак абсолютні значення підймальної сили є меншими, що пояснюється істотно нижчою густиною компресійної піни (150 кг/м³). Як результат, корисна підймальна сила залишається практично стабільною в усьому діапазоні витрат (реактивна складова становить лише 3–4 Н, а результуюча підймальна сила 134 Н). Варто відмітити, що у випадку використання компресійної піни для гасіння зазначеної пожежі корисна підйомна сила є на 85 % меншою порівняно з водою.

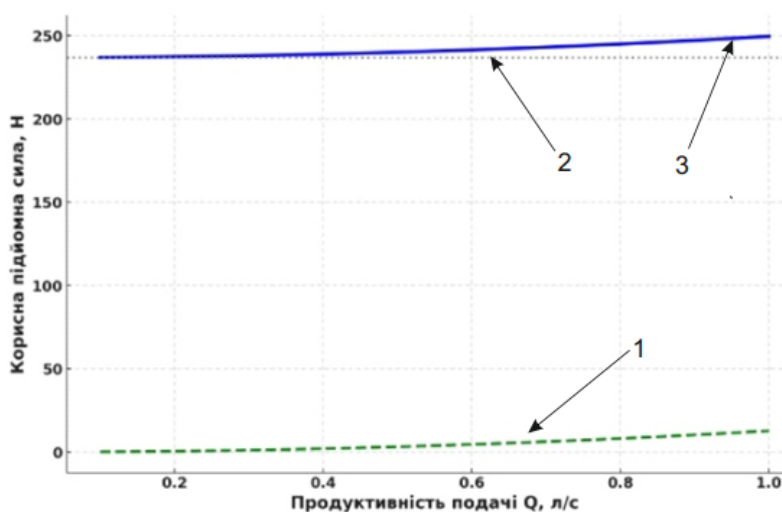


Рис. 2. Залежність корисної підйомної сили від продуктивності подачі для води за умови використання рукава діаметром 19 мм за подачі на висоту 48 м

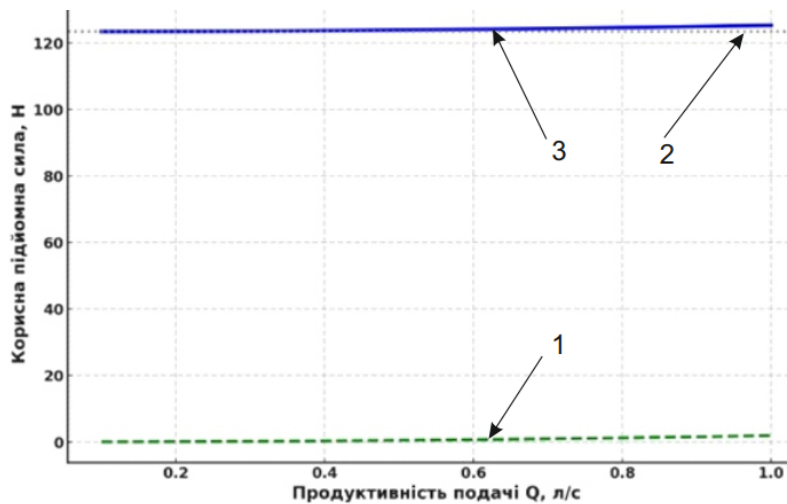


Рис. 3. Залежність корисної підйомної сили від продуктивності подачі за умови використання рукава діаметром 19 мм за подачі на висоту 48 м

На наступному етапі дослідимо, як впливає висота умовної пожежі на корисну підйомну силу. Вважатимемо середню продуктивність подачі як води, так і компресійної піни 0,5 л/с. На рисунку 4 відображено корисну підйомну силу від висоти умовної пожежі в разі подачі води (а) і компресійної піни (б).

Оскільки абсолютне значення реактивної складової порівняно зі значенням сили, яку створює наповнений рукав із вогнегасною речовиною, є незначним, криві 2 і 3 практично збігаються на обох графіках. Продуктивність подачі – у межах 0,5 л/с, реактивна складова при цьому є прямою лінією, що позначена лінією 1.

Аналіз графічних залежностей свідчить, що умовна висота подачі вогнегасних речовин

є домінуючим чинником, який визначає корисну підйомну силу для пожежних БПЛА, а реактивна складова, яка виникає на стволі, визначається витратою та густиною вогнегасної речовини і за продуктивності до 1 л/с становить лише 0,9–7,6 % у разі використання води та 0,5–3 % з використанням компресійної піни за умови висоти подачі вогнегасних речовин на висоту 48 м. За цих умов мінімальна підйомна сила для БПЛА має становити 247,5 Н у разі подачі води і 134 Н у разі подачі компресійної піни з урахуванням маси додаткового навантаження 0,5 кг.

Висновки та перспективи подальших досліджень. За результатами теоретичного дослідження впливу ключових чинників на корисну підйомну силу БПЛА, що використовуються

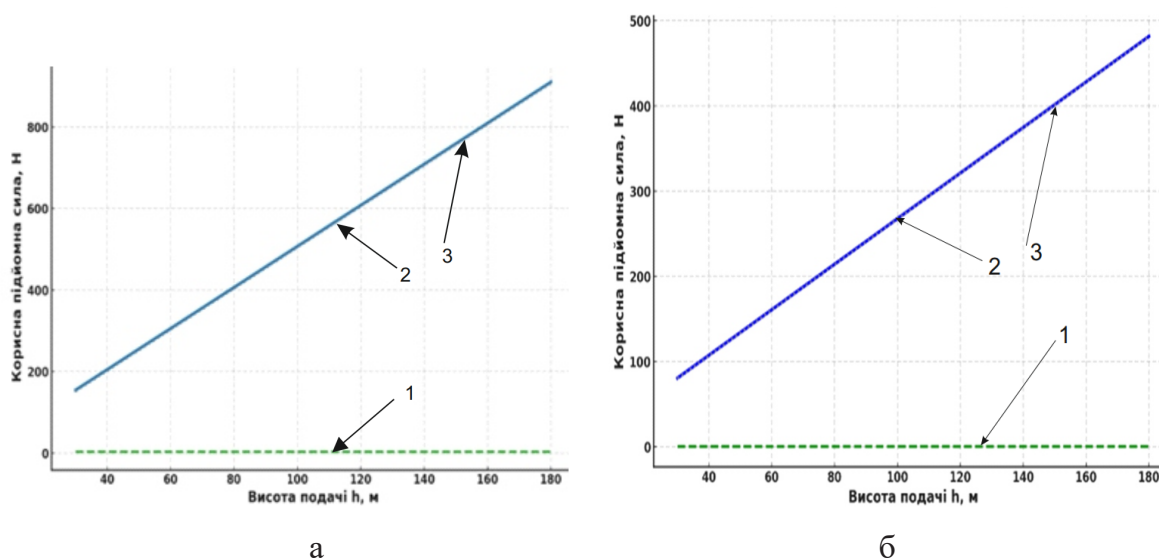


Рис. 4. Залежність корисної підйомної сили від висоти пожежі за продуктивності подачі 0,5 л/с за умови використання рукава діаметром 19 мм

для гасіння висотних пожеж із подачею вогнегасних речовин через рукав, отримано такі висновки:

1. Встановлено, що умовна висота пожежі, а отже, вага стовпа вогнегасної речовини у рукаві є домінуючим чинником, що визначає загальну корисну підймальну силу БпЛА. Статичне навантаження від рукава (лінія 2, рис. 2) є незмінним за фіксованих висоти та діаметра рукава, що свідчить про його критичне значення для вибору підймальних характеристик БпЛА.

2. Реактивна сила, що виникає на стволі під час витоку вогнегасної речовини, має залежність від продуктивності подачі, проте її внесок у загальне навантаження є відносно незначним. У разі використання води з продуктивністю на стволі 0,1–1,0 л/с (за висоти подачі 48 м) реактивна сила становить лише 0,9–7,6 % від сумарного зусилля, що протидіє підйому. А з використанням компресійної піни цей показник ще менший – 0,5–3 % загального навантаження, що підтверджує доцільність використання піни для зменшення навантаження на БпЛА.

3. Для забезпечення гасіння умовної пожежі на висоті 48 м із використанням рукава діаметром 19 мм і додаткового обладнання масою 0,5 кг мінімальна необхідна корисна підймальна сила БпЛА має становити: 247,5 Н – у разі подачі води та 134 Н – у разі подачі компресійної піни (за продуктивності 1 л/с).

4. Підтверджено, що використання компресійної піни як вогнегасної речовини значно знижує вимоги до підймальної сили БпЛА на 85 % менше навантаження, ніж у разі використання води (за описаних умов), що є ключовим фактором для підвищення доступної робочої висоти та тривалості польоту БпЛА.

На основі отриманих теоретичних результатів подальші дослідження будуть зосереджені на експериментальній валідації моделі, а саме проведення повномасштабних натурних експериментів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Wang K., Yuan Y., Chen M., Lou Z., Zhu Z., Li R. A study of fire drone extinguishing system in high-rise buildings. *Fire*. 2022. Vol. 5 (3), 75. DOI: <https://doi.org/10.3390/fire5030075>.
2. Viegas C., Chehreh B., Lourenço J. Tethered UAV with combined multi-rotor and water jet propulsion for forest fire fighting. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2022. Vol. 104, 48. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10846-021-01532-w>.
3. Fattori F., Cocuzza R., Garbugli M., Cattarysse E., Nitti M. Tethered drones: A comprehensive review of technologies, challenges and applications. *Drones*. 2025. Vol. 9 (6), 425. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones906042>.
4. Yamauchi Y., Kondoh Y., Hagihara A., Aiba S. Development of a remotely controllable 4 m long aerial-hose-type firefighting robot. *Frontiers in Robotics and AI*. 2023. Vol. 10, 1273676. DOI: <https://doi.org/10.3389/frobt.2023.1273676>.
5. Tavakol Sadrabadi M. T., Peiró J., Innocente M., Rein G. Conceptual design of a wildfire emergency response system empowered by swarms of unmanned aerial vehicles. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2025. Vol. 124, 105493. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2025.105493>.
6. Peña P. F., Ragab A. R., Luna M. A., Ale Isaac M. S., Campoy P. WILD HOPPER: A heavy duty UAV for day and night firefighting operations. *Heliyon*. 2022. Vol. 8 (6), e09588. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09588>.
7. Bhat N. S., Shashidhara K. S., Dakulagi V. Fire Fighting Un-manned Air Vehicle for Remote Areas. In: Pawar P. M., Balasubramaniam R., Ronge B. P., Salunkhe S. B., Vibhute A. S., Melinamath B. (eds). *Techno-Societal 2020*. Cham: Springer, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-69921-5_60.
8. Aydin B., Selvi E., Tao J., Starek M. J. Use of fire-extinguishing balls for a conceptual system of drone-assisted wildfire fighting. *Drones*. 2019. Vol. 3 (1), 17. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones3010017>.
9. Innocente M. S., Grasso P. Self organising swarms of firefighting drones: Harnessing the power of collective intelligence in decentralised multi robot systems. *Journal of Computational Science*. 2019. Vol. 34. P. 80–101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2019.04.009>.
10. Afghah F., Razi A., Chakareski J., Ashdown J. Wildfire monitoring in remote areas using autonomous unmanned aerial vehicles. *IEEE INFOCOM 2019 – IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, Paris, France, 2019, pp. 835–840. DOI: <https://doi.org/10.1109/INFOCOMW.2019.8845309>.
11. Qin H. et al. Design and implementation of an unmanned aerial vehicle for autonomous firefighting missions. *12th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA)*, Kathmandu, Nepal, 2016, pp. 62–67. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCA.2016.7505253>.
12. Ando H. et al. Aerial hose type robot by water jet for fire fighting. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2018. Vol. 3 (2). P. 1128–1135. DOI: <https://doi.org/10.1109/LRA.2018.2792701>.
13. Ogawa S., Kudo S., Koide M., Torikai H., Iwatani Y. Development and control of an aerial extinguisher with an inert gas capsule. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2014)*, Bali, Indonesia, 2014, pp. 1320–1325. DOI: <https://doi.org/10.1109/ROBIO.2014.7090516>.
14. Sherstjuk V., Zharikova M., Sokol I. Forest fire fighting using heterogeneous ensemble of unmanned aerial vehicles. *IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehi-*

cles Developments (APUAVD), Kiev, Ukraine, 2019, pp. 218–223. DOI: <https://doi.org/10.1109/APUAVD47061.2019.8943826>.

15. Chen H., Cao H., Cheng J., Xie J. Study on urban emergency firefighting flying robots based on UAV. *IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, Chengdu, China, 2019, pp. 1890–1893. DOI: <https://doi.org/10.1109/IAEAC47372.2019.8997723>.

16. Manimarabopathy M., Christopher H., Vignesh S. Unmanned fire extinguisher using quadcopter. *International Journal of Smart Sensing and Intelligent Systems*. 2017. Vol. 10 (3). P. 471–481.

17. Wang K., Yuan Y., Chen M., Lou Z., Zhu Z., Li R. A study of fire drone extinguishing system in high-rise buildings. *Fire*. 2022. Vol. 5 (3), 75. DOI: <https://doi.org/10.3390/fire5030075>.

18. Advancing firefighting technology: Testing extinguishing drones for high-rise fires. *Fire Safety World*, 2024, February 18. URL: <https://firesafeworld.com/advancing-firefighting-technology-testing-extinguishing-drones-for-high-rise-fires/>.

19. Quollnet. Advanced fire safety solution for high rise buildings. 2025, April 7. URL: <https://quollnet.com/article/Advanced-Fire-Safety-Solution-for-High-Rise-Buildings>.

20. European Committee for Standardization (CEN). Fire-fighting hoses – Semi-rigid hoses for fixed systems (EN 694:2014). Brussels: CEN, 2014.

21. U.S. Department of Energy. Fire Protection (DOE-STD-1066-2016). Washington, D.C.: U.S. Department of Energy, 2016. 162 p.

22. National Fire Protection Association (NFPA). NFPA 15: Standard for Water Spray Fixed Systems for Fire Protection. 2022 ed. Quincy, MA: NFPA, 2022. 98 p.

23. Weinschenk C. G., Madrzykowski D. M., Stakes K., Willi J. M. Examination of Compressed Air Foam (CAF) for Interior Fire Fighting (NIST Technical Note 1927). Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, 2017. DOI: <https://doi.org/10.6028/NIST.TN.1927>.

24. Society of Fire Protection Engineers (SFPE). Fire Flow in Fire Protection Engineering (FPE eXTRA). December 2024. Bethesda, MD: SFPE, 2024.

REFERENCES

1. Wang, K., Yuan, Y., Chen, M., Lou, Z., Zhu, Z., & Li, R. (2022). A study of fire drone extinguishing system in high-rise buildings. *Fire*, 5 (3), 75. <https://doi.org/10.3390/fire5030075>.

2. Viegas, C., Chehreh, B., & Lourenço, J. (2022). Tethered UAV with combined multi-rotor and water jet propulsion for forest fire fighting. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 104, 48. <https://doi.org/10.1007/s10846-021-01532-w>.

3. Fattori, F., Cocuzza, R., Garbugli, M., Catrysse, E., & Nitti, M. (2025). Tethered drones: A comprehensive review of technologies, challenges and applications. *Drones*, 9 (6), 425. <https://doi.org/10.3390/drones906042>.

4. Yamauchi, Y., Kondoh, Y., Hagihara, A., & Aiba, S. (2023). Development of a remotely controllable 4 m long aerial-hose-type firefighting robot. *Frontiers in Robotics and AI*, 10, 1273676. <https://doi.org/10.3389/frobt.2023.1273676>.

5. Tavakol Sadrabadi, M. T., Peiró, J., Innocente, M., & Rein, G. (2025). Conceptual design of a wildfire emergency response system empowered by swarms of unmanned aerial vehicles. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 124, 105493. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2025.105493>.

6. Peña, P. F., Ragab, A. R., Luna, M. A., Ale Isaac, M. S., & Campoy, P. (2022). WILD HOPPER: A heavy duty UAV for day and night firefighting operations. *Heliyon*, 8 (6), e09588. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09588>.

7. Bhat, N. S., Shashidhara, K. S., & Dakulagi, V. (2021). Fire fighting unmanned air vehicle for remote areas. In P. M. Pawar, R. Balasubramaniam, B. P. Ronge, S. B. Salunkhe, A. S. Vibhute, & B. Melinamath (Eds.), *Techno-Societal2020* (pp. 835–840). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69921-5_60.

8. Aydin, B., Selvi, E., Tao, J., & Starek, M. J. (2019). Use of fire-extinguishing balls for a conceptual system of drone-assisted wildfire fighting. *Drones*, 3(1), 17. <https://doi.org/10.3390/drones3010017>.

9. Innocente, M. S., & Grasso, P. (2019). Self-organising swarms of firefighting drones: Harnessing the power of collective intelligence in decentralised multi-robot systems. *Journal of Computational Science*, 34, 80–101. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2019.04.009>.

10. Afghah, F., Razi, A., Chakareski, J., & Ashdown, J. (2019). Wildfire monitoring in remote areas using autonomous unmanned aerial vehicles. In *IEEE INFOCOM 2019 – IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)* (pp. 835–840). IEEE. <https://doi.org/10.1109/INFOCOMW.2019.8845309>.

11. Qin, H., Li, Y., Zhang, X., & Zhang, Y. (2016). Design and implementation of an unmanned aerial vehicle for autonomous firefighting missions. In *2016 12th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA)* (pp. 62–67). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCA.2016.7505253>.

12. Ando, H., et al. (2018). Aerial hose type robot by water jet for fire fighting. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3 (2), 1128–1135. <https://doi.org/10.1109/LRA.2018.2792701>.

13. Ogawa, S., Kudo, S., Koide, M., Torikai, H., & Iwatani, Y. (2014). Development and control of an aerial extinguisher with an inert gas capsule. In *2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2014)* (pp. 1320–1325). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ROBIO.2014.7090516>.

14. Sherstjuk, V., Zharikova, M., & Sokol, I. (2019). Forest fire fighting using heterogeneous ensemble of unmanned aerial vehicles. In *2019 IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)*

(pp. 218–223). IEEE. <https://doi.org/10.1109/APUAVD47061.2019.8943826>.

15. Chen, H., Cao, H., Cheng, J., & Xie, J. (2019). Study on urban emergency firefighting flying robots based on UAV. In 2019 IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC) (pp. 1890–1893). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IAEAC47372.2019.8997723>.

16. Manimaraboopathy, M., Christopher, H., & Vignesh, S. (2017). Unmanned fire extinguisher using quadcopter. *International Journal of Smart Sensing and Intelligent Systems*, 10 (3), 471–481.

17. Wang, K., Yuan, Y., Chen, M., Lou, Z., Zhu, Z., & Li, R. (2022). A study of fire drone extinguishing system in high-rise buildings. *Fire*, 5 (3), 75. <https://doi.org/10.3390/fire5030075>.

18. Fire Safety World (2024, February 18). Advancing firefighting technology: Testing extinguishing drones for high-rise fires. Retrieved from: <https://fire-safeworld.com/advancing-firefighting-technology-testing-extinguishing-drones-for-high-rise-fires/>.

19. Quollnet (2025, April 7). Advanced fire safety solution for high rise buildings. Retrieved from: <https://quollnet.com/article/Advanced-Fire-Safety-Solution-for-High-Rise-Buildings>.

20. European Committee for Standardization (CEN). (2014). Fire-fighting hoses – Semi-rigid hoses for fixed systems (EN 694:2014). CEN.

21. U.S. Department of Energy (2016). Fire protection (DOE-STD-1066-2016). U.S. Department of Energy.

22. National Fire Protection Association (NFPA) (2022). NFPA 15: Standard for water spray fixed systems for fire protection (2022 ed.). NFPA.

23. Weinschenk, C. G., Madrzykowski, D. M., Stakes, K., & Willi, J. M. (2017). Examination of compressed air foam (CAF) for interior fire fighting (NIST Technical Note 1927). National Institute of Standards and Technology. <https://doi.org/10.6028/NIST.TN.1927>.

24. Society of Fire Protection Engineers (SFPE). (2024, December). Fire flow in fire protection engineering (FPE eXTRA). SFPE.

© І. І. Калужняк, А. Ф. Гаврилюк, Д. В. Фреюк

Науково-методична стаття.

Стаття надійшла до редакції 25.09.2025

Стаття прийнята 13.10.2025

Статтю опубліковано 23.12.2025



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.47.2025.07>

*М. А. Куценко¹, І. П. Романюк², О. В. Кириченко¹, О. В. Ніконішин³,
Є. В. Школяр¹, Р. Б. Мотрічук¹, С. О. Хряпак¹, І. І. Іщенко¹*

¹ Національний університет цивільного захисту України,

м. Черкаси, Україна

² Головне управління ДСНС України в Полтавській області,

м. Полтава, Україна

³ Міністерство внутрішніх справ України, м. Київ, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6879-9187> – М. А. Куценко
<https://orcid.org/0000-0003-0427-5645> – І. П. Романюк
<https://orcid.org/0000-0002-0240-1807> – О. В. Кириченко
<https://orcid.org/0009-0007-4657-4949> – О. В. Ніконішин
<https://orcid.org/0000-0002-7304-1677> – Є. В. Школяр
<https://orcid.org/0000-0002-5670-6788> – Р. Б. Мотрічук
<https://orcid.org/0000-0001-9078-976X> – С. О. Хряпак
<https://orcid.org/0009-0000-5050-4926> – І. І. Іщенко



shkoliar_yevhenii@nuczu.edu.ua

ПЕРЕВАГИ І НЕДОЛІКИ ПОРОШКОВИХ ЗАСОБІВ ГАСІННЯ ПОЖЕЖІ ТА ШЛЯХИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ЦИХ ЗАСОБІВ

Проблема. Порошкові засоби гасіння пожеж, незважаючи на їхню високу ефективність та екологічну безпеку, мають низку обмежень, що ускладнюють їх застосування в умовах технологічних процесів і на об'єктах з підвищеним рівнем техногенної небезпеки. Серед основних недоліків – короткочасна дія, утворення щільної хмари пилу, що різко погіршує видимість, схильність до комкування під час зберігання, а також низька ефективність у разі гасіння розливів горючих рідин на великій площі (особливо на поверхні водойм), оскільки порошок не створює стійкого ізолюючого шару й не запобігає повторному займанню.

Мета – обґрунтування шляхів удосконалення вогнегасних порошкових засобів шляхом іммобілізації вогнегасних солей на високопористих носіях (мінеральних і рослинних), що дає можливість усунути їх ключові експлуатаційні недоліки та розширити сферу застосування, зокрема для гасіння пожеж горючих рідин на поверхні водойм та для попередження поширення пожеж на торфовищах.

Методи дослідження. У роботі використано порівняльний аналіз механізмів дії порошкових засобів, впливу дисперсності на вогнегасну ефективність порошкових сумішей, а також експертну оцінку технологічних обмежень при виготовленні та зберіганні. Запропоновано інженерні рішення на основі іммобілізації вогнегасних солей на природних носіях.

Основні результати дослідження. Встановлено, що порошки мікронного розміру мають високу гасильну здатність, але є нестабільними під час зберігання. Як альтернативний підхід, що вирішує проблеми зберігання та комкування традиційних ВГП, розглядаються системи аерозольного пожежогасіння. У них вогнегасна речовина – дрібнодисперсний аерозоль – генерується безпосередньо в захищеному приміщенні під час спрацювання генератора вогнегасного аерозолю. Розроблено метод іммобілізації активних компонентів на внутрішній поверхні капілярів високопористих мінералів або деревної тирси, що дає змогу стабілізувати властивості порошку та розширити сферу його застосування.

Висновки та конкретні пропозиції автора. Порошкові засоби гасіння можуть бути ефективно адаптовані до використання на складних об'єктах, зокрема для гасіння пожеж на водній поверхні та торфовищах, за умови вдосконалення їх фізико-хімічних характеристик. У статті пропонується

впровадження технології іммобілізації вогнегасних солей на природних носіях як перспективний напрям для підвищення стабільності та функціональності порошкових рецептур.

Ключові слова: порошкові засоби, техногенна безпека, носії, іммобілізація, гасіння пожеж.

*M. A. Kutsenko¹, I. P. Romaniuk², O. V. Kyrychenko¹, O. V. Nikonishyn³,
Ie. V. Shkoliar¹, R. B. Motrichuk¹, S. O. Khriapak¹, I. I. Ishchenko¹*

¹ National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

² State Emergency Service of Ukraine in Poltava region, Poltava, Ukraine

³ Ministry of Internal Affairs of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF POWDER FIRE EXTINGUISHING AGENTS AND WAYS OF IMPROVING THESE AGENTS

Problem. Powder fire extinguishing agents, despite their high efficiency and environmental safety, have a number of limitations that complicate their use in technological processes and at facilities with an increased level of technogenic hazard. Among the main disadvantages we may mention short-term action, high specific density, tendency to clump during storage, and unsuitability for extinguishing fires of flammable liquids on the surface of water bodies and peatlands.

Purpose. Substantiation of the methods for improving dry powder extinguishing agents by immobilizing extinguishing salts onto highly porous carriers (mineral and plant-based), which allows for the elimination of their key operational drawbacks and the expansion of their scope of application, specifically for extinguishing flammable liquid fires on water surfaces and for preventing fire spread on peatlands.

Research methods. The work uses a comparative analysis of the mechanisms of action of powder agents, modeling of the influence of particle size on extinguishing efficiency, as well as an expert assessment of technological limitations in manufacturing and storage. Engineering solutions based on the immobilization of fire-extinguishing salts on natural carriers are proposed.

Main results of the study. It was found that micron-sized powders have high extinguishing capacity, but are unstable during storage. An alternative approach is proposed – the formation of the powder directly during the operation of the fire-extinguishing aerosol generator. A method of immobilizing active components on the inner surface of the capillaries of highly porous minerals or wood sawdust has been developed, which allows stabilizing the properties of the powder and expanding the scope of its application.

Author's conclusions and specific suggestions. Powder extinguishing agents can be effectively adapted for use on complex objects, in particular for extinguishing fires on water surfaces and peatlands, provided that their physicochemical characteristics are improved. The article proposes the implementation of the technology of immobilization of fire extinguishing salts on natural carriers as a promising direction for increasing the stability and functionality of powder compositions in fire prevention systems of technological processes.

Key words: fire prevention, powder products, technological processes, technogenic safety, immobilization, fire extinguishing.

Постановка проблеми. Порівняно з охолоджувальними (водою та її розчинами), флегматизуючими (інертні газы) та ізолюючими (вогнегасні піни) засоби, що діють за фізико-хімічним механізмом інгібування (хладони та вогнегасні порошкові композиції), у разі гасіння однакових за площею і за потужністю пожеж потребують значно менших кількостей і припиняють горіння в коротші терміни. При цьому з погляду екології порошки мають суттєві переваги. Суттєвою перевагою вогнегасних порошків є їхня відносна екологічна безпечність порівняно з іншими вогнегасними речовинами. На відміну від хладонів, використання яких обмежене через високий озоноруйнівний потенціал, і фторвмісних піноутворювачів, які спричиняють довгострокове токсичне забруднення ґрунтів та вод стійкими сполуками, вогнегасні порошки не мають такого критичного впливу на довкілля.

До експлуатаційних переваг порошків також належить зручність зберігання, оскільки вони не вимагають значних площ чи особливих умов (окрім захисту від вологи), а також простота застосування, що не потребує складного і габаритного обладнання.

Недоліки – відносно короткочасна дія і обмежена область застосування та деякі технологічні труднощі у виготовленні. Саме на вдосконалення цих показників порошкових вогнегасних засобів повинні спрямовуватися дослідження з їх модернізації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У разі горіння органічних речовин основними проміжними частинками є вільні радикали. Ці частинки дуже активні, за короткий проміжок часу (за 10^{-8} – 10^{-9} частки секунди) вони встигають перетворитися в нові сполуки самі та

ініціювати утворення нових вільних радикалів. Кожен із вільних радикалів здатен започаткувати до мільярда перетворень за одну секунду. Вилучення з процесу більшості таких частинок веде до уповільнення розвитку горіння та до повного його припинення [1]. Кожної миті в горючій суміші їх досить мало, тому введення в зону горіння 2–3 % від об'єму цієї зони хімічно активного інгібітора зазвичай є достатнім для дезактивації наявних вільних радикалів і для придушення вогню. Для порівняння: для гасіння такої ж пожежі флегматизуючого агента (інертного газу) треба ввести у 20–30 разів більше.

Типовими інгібуючими засобами є галогеновуглеводні (фреони або хладони) і порошкові вогнегасні композиції. При цьому фреони більш ефективні, ніж порошкові композиції. Але галогеновуглеводні шкідливі для навколишнього середовища й персоналу, який з ними працює. До того ж вважається, що фреони відповідальні за появу дірок у захисному озоновому шарі Землі, і наприкінці 80-х років минулого століття Монреальським протоколом про речовини, що руйнують озоновий шар, було рекомендовано заборонити застосування й навіть виробництво галогеновуглеводнів, особливо найбільш летючих із них, хладонів: 14 (CCl_4), 13 (CF_3Cl), 13B1 (CF_3Br), 115 ($\text{C}_2\text{F}_5\text{Cl}$), 12 (CF_2Cl_2) та 12B1 (CF_2ClBr). Порошкові вогнегасні композиції цього недоліку позбавлені. Їх головні компоненти – фосфати, карбонати й бікарбонати амонію, калію та натрію, тобто солі, які звичайно застосовуються як мінеральні добрива [2]. Для зниження комкування під час збереження через злипання окремих частинок в агломерати, до суміші додають компоненти, які гідрофобізують композицію і забезпечують сипучість порошку. Ці добавки також являють собою солі, нешкідливі для навколишнього середовища.

Невирішені раніше частини загальної проблеми. Основною перевагою порошкових вогнегасних композицій є невелика порівняно з іншими засобами витрата засобу для гасіння однакових пожеж, що пояснюється інгібуючим ефектом. Цей ефект є основним фізико-хімічним механізмом дії таких композицій [1; 2]. Але деякий вплив мають і додаткові фактори. Висока теплоємність мінеральних солей, а також значні витрати тепла на їх плавлення, випаровування та розклад призводять до інтенсивного поглинання енергії із зони горіння, спричиняючи її помітне охолодження [1; 2]. До переваг порошоків належать також відсутність потреби у створенні якихось особливих умов для їх зберігання і простота доставки до місця пожежі. Недоліки цих засобів пов'язані здебільшого з їх питомою густиною. Доволі

швидко осідаючи на поверхню, вони залишають зону горіння. Покрити всю поверхню порошок не здатний, тому можливим є залишення окремих тліючих осередків, що може викликати повторне загорання [1; 2]. Питома густина будь-якої солі вдвічі-втричі більша за густину води. Крім того, практично всі солі, які входять до складу порошкових вогнегасних композицій, водорозчинні. Це звужує область застосування порошоків. Зокрема, унеможливує ефективне застосування порошоків для гасіння значних розливів горючих рідин (бензину, нафти) на поверхні водойм. На відміну від спеціалізованих пін, вогнегасний порошок не здатен утворювати на поверхні води стійкий ізолюючий шар. Частинки порошку швидко осідають (тонуть), що не запобігає повторному займанню рідини від нагрітих конструкцій чи прилеглих осередків горіння.

Мета статті – обґрунтування шляхів удосконалення вогнегасних порошкових засобів шляхом іммобілізації вогнегасних солей на високпористих носіях (мінеральних і рослинних), що дає можливість усунути їх ключові експлуатаційні недоліки та розширити сферу застосування, зокрема для гасіння пожеж горючих рідин на поверхні водойм і для попередження поширення пожеж на торфовищах.

Виклад основного матеріалу. Під час визначення оптимальних розмірів частинок звичайного порошкового засобу виникають протиріччя. Щодо застосування порошку, то чим менші розміри мають ці частинки, тим вони ефективніші, оскільки мають більшу сумарну поверхню. Але виробництво занадто дрібних порошоків викликає деякі технологічні труднощі. Кінцева операція у їх виготовленні – сушка, яка проводиться в повітряному потоці з подальшим відділенням від повітря. А дуже дрібний порошок схильний проскакувати крізь усі фільтри. Усуненням цього недоліку було створення генераторів вогнегасного аерозолі. В них вогнегасний порошок мікронних розмірів утворюється під час роботи генератора, тому на злежування у нього немає часу. Це дає змогу підвищити вогнегасну здатність порошку, однак він починає рухатися разом із повітрям, як і газуваті вогнегасні засоби: вуглекислий газ, азот та фреони, і може використовуватися переважно в закритих приміщеннях.

Пожежі горючих рідин на поверхні водойми виникають у разі аварії танкерів, які у великих кількостях перевозять нафту і продукти її переробки. Оскільки всі ці вуглеводні легші за воду, водою припинити їх горіння неможливо. Вода навіть збільшує площу пожежі, сприяючи розтіканню вуглеводнів. Для гасіння флегматизуючими засобами

(інертними газами) або хладами треба створити значну концентрацію гасильного агента, що на відкритому просторі практично недосяжно. Звичайні порошкові засоби бажаного ефекту в гасінні таких пожеж теж не дають. Питома густина солей, що входять до складу порошкових композицій, більша за 3 г/см^3 . Це значно перевищує питому густину і води, і вуглеводневих рідин. Будь-який порошок відразу після нанесення занурюється під поверхню та залишає зону горіння, яка в рідинах перебуває над поверхнею. На практиці з різним успіхом для припинення горіння нафтопродуктів на поверхні водойми застосовують повітряно-механічні піни. В умовах моря чи океану це дуже складно й дорого. До того ж переважна більшість піноутворювачів має синтетичне походження та чинить непоправну шкоду флорі та фауні водойми і прибережжя. Більшість відомих на сьогодні пожеж горючих рідин на поверхні водойми ліквідовувалися переважно лише після повного вигорання розлитої речовини. Наслідками таких інцидентів ставали прямі економічні збитки (через знищення цінного продукту) та масштабне екологічне забруднення атмосфери та водного басейну продуктами горіння й залишками речовини.

Дуже складно гасити пожежі і на торфовищах, що обумовлено декількома факторами. Ці пожежі поширюються і поверхнею, і під нею. Ізоляційні засоби гасіння, у тому числі повітряно-механічні піни, тут непридатні, оскільки пористий торф має у своїй структурі повітря в кількості, достатній для підтримання стійкого горіння, тож наявність зовнішнього повітря для горіння торфу не є критичною. Створити значну концентрацію флегматизатора чи хладону тут, як і на морі, теж неможливо. Пожежу, яка поширюється торфовищем, неможливо загасити і вогнегасним порошком. Цей засіб можна розпилити лише на поверхню. Під поверхню ж, де зазвичай горіння поширюється тлінням, він не проникає. Єдиним засобом, який використовується для гасіння пожеж торфовищ сьогодні, є засіб охолоджувальний – вода. На жаль, задовільних результатів це не дає. У разі подавання води на поверхню вона або на поверхні ж і лишається, або стікає струмочками в окремі порожнини і тління не припиняє. Для ліквідації тління використовують спеціальне складне обладнання, зокрема довгі стволи, які занурюють на десятки метрів [3; 4]. Крізь ці стволи подають дуже велику кількість холодної води, у середньому використовують тонну води для припинення тління 1 кубометра торфу. А цю воду треба ще й доставляти, і найчастіше за десятки кілометрів. У більшості випадків пожежі на торфовищах продовжуються тижнями, а то й місяцями.

Не менших зусиль потребує і попередження поширення таких пожеж. Мета, яка тут звичайно ставиться, – обмежити район пожежі, не дати їй поширюватися за певні межі. Сучасні рекомендації для досягнення цієї мети передбачають три моменти: профілактична робота з населенням, обладнання протипожежних розривів і заводнення торф'яників. Робота з населенням здебільшого має чисто формальне значення. Інші два методи базуються на зниженні навколо потенційної зони горіння кількості горючих речовин.

Заводнення осушених торф'яників полягає у створенні комплексу з мережі каналів зі спеціальними засувками для затримання води. Щоб створити необхідний обсяг води в каналах, прокладають тимчасові багатокілометрові трубопроводи, якими воду переміщують із великих відстаней або в кращому випадку перекачують її з довколишніх водойм. Канали доводиться часто поповнювати, особливо спекотним літом. Усе це потребує великої кількості техніки і значних працевитрат.

Для обладнання протипожежних розривів певні площі обмежують широкими канавами й викопаними ровами. Копають до ґрунтових вод або до мінерального ґрунту. Для попередження запливання й подальшого заповнення каналів торфом рови заповнюють негорючим фільтрувальним матеріалом, набивними палями у ґрунтоцементній оболонці або встановлюють у ровах азбоцементні труби, заповнені вогнетривким штучним (шамот, шлак) чи природним (кварцовий пісок, каолін) матеріалом [5]. За іншим методом для заповнення ровів використовують суспензію з води та бентонітової глини або суміш речовин, здатних за підвищення температури розкладатися з виділенням вуглекислого газу [6]. Усі ці методи потребують дуже великих витрат і праці, яку можна назвати титанічною. І спрямовані вони на захист від пожежі, яка вже виникла й поширюється всією глибиною торф'яника. Вихідним постулатом є пануюча гіпотеза про виникнення загорання саме в глибині торфовища за тепловим або мікробіологічним механізмом самозагорання. Між тим останніми роками більшість провідних учених цієї галузі вказують на дуже малу вірогідність реалізації такого механізму в масі торф'яника, адже цей механізм передбачає попередній прогрів маси до температури самозаймання, що в умовах поверхневого зеленого світло-і теплоізолюючого шару неможливо навіть у дуже спекотну погоду. Самозаймання торфу може відбутися лише в місцях його видобутку, де висушений продукт чорного кольору лежить великими штабелями й поглинає сонячне випромінювання.

Згідно із сучасними поглядами, полум'я на торфовищах виникає за примусовим фізико-хімічним механізмом. Практично це завжди пов'язано з підпалом. Причому найчастіше з навмисною або випадковою дією людини (з кинутими незагашеними недопалками та сірниками, вогнищами, залишеними без нагляду, іскрами з глушників автомашин і мотоциклів). У дуже рідких випадках підпал може викликати блискавка. Але в будь-якому випадку виникає вогонь не в глибині, а на поверхні. Уже потім, крім поверхні, йде поширення і в глибину. Це означає, що захищати слід саме поверхневі шари. Звичайно, найкраще було б постійно тримати всю поверхню торфовища зволоженою. Практично ж це неможливо, особливо в найбільш пожежонебезпечний період, у літні місяці. Вода випаровуватиметься за лічені години, а то й хвилини. На певний період, зважаючи на ефективність дії і екологічність, як профілактичний засіб можна було б розсіяти по потенційно небезпечній поверхні розраховану кількість вогнегасного порошку. Зрозуміло, що це дорого, але не дорожче, ніж гасити таку пожежу або огорожувати потенційно небезпечні ділянки багатокілометровими глибокими ровами. На жаль, саме для застосування із цією метою, як і для гасіння пожеж горючих рідин на поверхні водойми, сучасні вогнегасні порошки непридатні. Головні їх компоненти – водорозчинні солі. Отже, перший же дощ або навіть роса, вимийуть порошок у нижчі шари.

Таким чином, головним шляхом вдосконалення вогнегасних порошкових засобів можна вважати модифікацію їх у напрямі розширення сфери застосування з тим, щоб зробити ці засоби придатними для гасіння найбільш складних пожеж – горіння вуглеводневих рідин на поверхні водойми, а також для попередження поширення пожеж на торфовищах, що дотепер вимагає великої кількості техніки і значних працевитрат. В обох випадках бажано, щоб ці засоби були відносно недорогими й екологічно безпечними. Для припинення горіння вуглеводневих рідин на поверхні водойми треба забезпечити їх певну плавучість, тобто постійне перебування в зоні горіння рідини. Для попередження поширення пожежі на торфовищі її треба придушити в самому початку. А оскільки виникає ця пожежа на поверхні, потрібно захищати саме поверхню, причому засіб повинен бути таким, який потребуватиме не постійної участі обслуговуючого персоналу, а лише періодичного, раз на два-три роки, поповнення нанесеного шару. В обох випадках засоби повинні довго лишатися неушкодженими на поверхні моря чи торфовища, зберігаючи вогнегасні властивості. Запускатися ж

власне механізм гасіння повинен за підвищення температури, тобто в разі виникнення полум'я.

Одним із можливих шляхів розробки вогнегасних засобів, які б відповідали перерахованим вимогам, є виготовлення й використання вогнегасних солей, нанесених на внутрішню поверхню порожнин високопористих носіїв. Такі засоби останнім часом розробляються в Національному університеті цивільного захисту України [7–18]. Розроблено два основні різновиди: з використанням як носія мінеральної основи – спученого вермикуліту або спученого перліту [7] та з використанням тирси деревини [8]. В обох випадках в дуже вузькі пори носія іммобілізуються водні розчини вогнегасних солей, переважно фосфатів амонію. Подальше висушування залишає шар солі, адсорбований на внутрішніх стінках капілярів носія. Малий діаметр капілярів і значний поверхневий натяг водних розчинів перешкоджають прямому введенню розчинів, тому доводиться застосовувати спеціальну процедуру.

У випадку мінеральних носіїв з їх жорсткою структурою використовується вакуумна техніка. Гранули вермикуліту розміщуються під поверхнею розчину й утримуються сіткою з розміром вічка, меншим, ніж розмір гранули. Під дією невеликого вакууму з капілярів відсмоктується повітря. Після ж наступного з'єднання простору над сіткою з атмосферним тиском повітря в капілярах замінюється розчином вогнегасної солі. Висушування залишає легкі гранули, капіляри в яких заповнені адсорбованою вогнегасною сіллю. Співвідношення носій : сіль регулюється так, щоб насипна маса висушеного продукту була не більшою за 0,7–0,8 г/см³, що під час застосування дає можливість засобу завжди плавати на поверхні горючої рідини, тобто саме в зоні горіння.

Тирса ж деревини завдяки еластичності стінок капілярів дає змогу заповнювати ці капіляри без вакууму, просто декілька разів стискаючи й відпускаючи масу тирси в розчині, який ця маса вбирає подібно губці.

Кожен із носіїв має свої переваги. Гранули вермикуліту відрізняються достатньо великими розмірами (від 0,5 до 5 мм) за дуже низької насипної маси (0,065–0,150 г/см³). Підприємствами спучених матеріалів вони випускаються розсіяними по фракціях. Це дає змогу варіювати розміри частинок вогнегасного засобу, підбирати гранули так, щоб вони мали оптимальну величину: були достатньо малими, щоб забезпечити покриття якомога більшої поверхні, але достатньо великими, щоб не виноситись із зони горіння конвективними потоками відразу після введення. Основний недолік засобів на основі мінерального

носія – необхідність застосування для їх виготовлення вакуумної техніки. Хоча потрібне тут розрізнення й невелике ($R_{\text{залишкове}} = 400\text{--}500$ мм рт. ст.), усе ж його необхідність збільшує собівартість.

Тирса деревини із цього погляду здається більш привабливою. Її недолік – більша насипна маса. Це з огляду на необхідність забезпечення потрібної плавучості засобу дещо обмежує можливості введення значної кількості вогнегасної солі.

У разі застосування для гасіння пожеж вуглеводневих рідин на поверхні водою гранули на основі спученого вермикуліту розташовуються на поверхні рідини та під дією вогню поступово віддають адсорбовані солі, які і придушують горіння.

Просочена вогнегасними солями тирса (якщо її використовувати як носій) за такого застосування залишається в зоні горіння, але не підтримує його. Горінню перешкоджає процес інгібування, який забезпечують солі, що є активними компонентами вогнегасних порошків, – найчастіше фосфати або бікарбонати. Натомість поверхневі шари деревини швидко піролізуються, перетворюючись у газоподібні речовини й вивільняючи вогнегасні солі.

Головним фізико-хімічним механізмом гасіння пожежі в обох випадках є механізм інгібування, тобто дезактивації активних частинок горіння. Але, розташовуючись на поверхні горючої рідини, вони додатково ще й зменшують поверхню випаровування цієї рідини, що знижує кількість горючого матеріалу, який надходить у зону горіння, адже горить не сама рідина, а її пари після того, як вони в зоні горіння перемішуються з повітрям.

Виготовлення засобів на основі високопористих носіїв, іммобілізованих вогнегасними солями, для використання як попереджувачів поширення пожеж навіть простіше, ніж призначених для гасіння рідин: не треба піклуватися про плавучість, тобто не треба вживати заходів для регулювання насипної маси, можна ввести максимальну кількість вогнегасної компоненти.

Проте ключовим недоліком такого підходу є висока розчинність вогнегасних солей у воді. Це призводить до їх неминучого вимивання (вилуговування) з пористого носія під дією атмосферних опадів, що зводить нанівець довгостроковий ефект просочення.

Твердження про те, що поверхневий натяг води завадить їй проникнути в пори, не витримує критики, оскільки воно ігнорує гігроскопічність самих солей і капілярні ефекти.

Саме тому шлях удосконалення цього методу лежить у додатковій іммобілізації солі. Цього можна досягти шляхом гідрофобізації просоченого носія, наприклад обробкою кремнійорганічними

(силіконовими) рідинами або іншими водовідштовхувальними зв'язуючими речовинами, які створять захисний бар'єр без погіршення вогнегасних властивостей.

За підвищення температури, як і у випадку горіння рідин, засоби на основі спученого вермикуліту віддаватимуть вогнегасні компоненти внаслідок десорбції, а засоби на основі тирси – після піролізу носія. Указані особливості дадуть змогу вносити такий засіб один раз на три-чотири роки.

Однією з переваг таких засобів є і їх абсолютна нешкідливість для навколишнього середовища. Спучений вермикуліт у сільському господарстві застосовується для структурування ґрунтів, солі амонію – як мінеральні добрива, а тирса деревини – натуральна речовина.

Запропонований метод принципово змінює технологічний ланцюг, усуваючи необхідність роботи з дрібнодисперсним пилом на етапах виробництва. Основні технологічні операції проводяться з водними розчинами солей, що кардинально покращує умови та гігієну праці, усуваючи ризики для органів дихання.

Хоча технологія передбачає енергозатратну стадію висушування просочених гранул, кінцевий продукт (з ефективним діаметром 2–4 мм) значно легше відділяти стандартними промисловими методами (циклони, вібросита), ніж мікронний пил традиційних ВГП. Це також спрощує процеси фасування та знижує втрати готового продукту.

Проведені техніко-економічні розрахунки [9; 11] показали, що навіть за організації випуску на пілотних установках очікувана собівартість виготовлених цим методом засобів є конкурентоспроможною. Вона нижча, ніж ринкова ціна найбільш поширених сьогодні вогнегасних порошків загального призначення (класів А, В, С).

Висновки. Розглянуто переваги і недоліки порошкових засобів гасіння пожежі. Відмічено, що на сьогодні з вогнегасних засобів у системі «ефективність – екологічність» найкращими є саме порошкові композиції. Показані недоліки цих засобів, які обмежують сферу їх застосування, зокрема непридатність їх для гасіння пожеж горючих рідин на поверхні водою і для попередження поширення пожеж на торфовищах, а також наявність деяких труднощів під час виготовлення. Для гасіння пожеж горючих рідин на поверхні водою показано необхідність застосування вогнегасного засобу, який здатен довгий час залишатися на поверхні рідини, тобто в зоні горіння її парів. Наголошується, що на торфовищі пожежа в переважній більшості випадків виникає не за механізмом самозагорання в його товщі, а на поверхні – за механізмом примусового загорання,

у зв'язку із чим попередження поширення цих пожеж доцільно організовувати шляхом придушення вогню в момент його виникнення і саме на поверхні.

Запропоновано шляхи вдосконалення порошкових засобів, які полягають в іммобілізації вогнегасних солей на внутрішню поверхню капілярів високопористих мінеральних носіїв (спученого вермикуліту) і в іммобілізації цих солей на внутрішню поверхню капілярів тирси деревини. Указані шляхи надають можливість розширити сферу застосування порошкових засобів, зокрема з успіхом використовувати їх для гасіння пожеж горючих рідин на поверхні водойм і для попередження поширення пожеж на торфовищах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Єлагін Г. І., Тищенко О. М., Алексєєв А. Г., Нуянзін В. М., Майборода А. О. Теорія виникнення, розвитку, горіння та вибуху. Припинення горіння. Черкаси : ЧПБ, 2020. 490 с.
2. Жартовський С. В., Мирошник О. М., Тищенко Є. О. Вогнегасні порошки та умови їх застосування : навч. посіб. Черкаси : вид. Третяков О. М., 2020. 250 с.
3. Спеціальний пожежний ствол для гасіння підземних пожеж : пат. 133683 Україна: МПК А62С 3/02 (2006.01) / Ковалишин В. В., Сукач Р. Ю., Антонов А. В. ; заявник і власник – Львівський державний університет безпеки життєдіяльності. № u2018 07685 ; заявл. 09.07.2018. Опубл. 25.04.2019. Бюл. № 8.
4. Кирилів Я. Б., Ковалишин В. В., Сукач Р. Ю. Пожежна небезпека торф'яників, торфорозробок та методи і засоби підвищення ефективності їх гасіння. Надзвичайні ситуації: безпека та захист : матеріали ІХ Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю. Черкаси : ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2019. С. 59–65.
5. Спосіб профілактики пожежонебезпечної площі торф'яного родовища : пат. 104989 Україна: МПК А62С 3/02 (2006.01) / Бідношея В. Я., Петруняк М. В. ; заявники і власники – Бідношея В. Я., Петруняк М. В. № u2015 09765 ; заявл. 2015. Опубл. 25.02.2016. Бюл. № 4.
6. Спосіб обмеження розповсюдження пожеж на торф'яниках : пат. на корисну модель № 135418 Україна / Поздєєв С. В. та ін. ; заявник і власник – Мигаленко К. І. № u201901248 ; заявл. 07.02.2019 ; чинне з 25.06.2019. Опубл. 25.06.2019. Бюл. № 12.
7. Вогнегасний засіб : пат. на корисну модель № 91400 Україна / Єлагін Г. І., Кришталь М. А., Палагін Р. А. ; заявники і власники – Єлагін Г. І., Кришталь М. А., Палагін Р. А. Опубл. 10.07.2014. Бюл. № 13/2014.
8. Спосіб виготовлення вогнегасного засобу : пат. на корисну модель № 136533 Україна / Єлагін Г. І., Ющук Ю. О., Алексєєва О. С. ; заявники і власники – Єлагін Г. І., Ющук Ю. О., Алексєєва О. С. Опубл. 27.08.2019. Бюл. № 16/2019.
9. Єлагін Г. І., Куценко М. А., Алексєєва О. С., Ющук І. О., Наконечний В. В., Заїка П. І. Техніко-економічне обґрунтування організації виготовлення засобів для гасіння пожеж горючих рідин на основі вогнегасних солей, іммобілізованих пористим носієм. Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація : зб. наук. пр. Черкас. ін-ту пожеж. безпеки ім. Героїв Чорнобиля Нац. ун-ту цивіл. захисту України. 2019. Т. 3, № 1. С. 42–50.
10. Спосіб виготовлення вогнегасного засобу : декларац. пат. на корисну модель № 141870 Україна / Єлагін Г. І., Нуянзін О. М., Тищенко Є. О., Алексєєва О. С., Наконечний В. В. ; заявники і власники – Єлагін Г. І., Нуянзін О. М., Тищенко Є. О., Алексєєва О. С., Наконечний В. В. Опубл. 27.04.2020. Бюл. № 8.
11. Куценко М. А., Єлагін Г. І., Алексєєв А. В., Наконечний В. В., Алексєєва О. С. Обґрунтування техніко-економічної доцільності гасіння пожеж розлитих горючих речовин засобами на основі пористих носіїв з іммобілізованими вогнегасними речовинами. Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація : зб. наук. пр. Черкас. ін-ту пожеж. безпеки ім. Героїв Чорнобиля Нац. ун-ту цивіл. захисту України. 2021. Т. 5, № 1. С. 67–77.
12. Jelagin G., Kutsenko M., Alekseev A., Nuianzin A., Nesen I. Extinguishing media for spilled flammable liquids. *The Scientific Heritage* (Budapest, Hungary). 2022. Vol. 1, No. 84. P. 15–25.
13. Несен І. О., Єлагін Г. І., Алексєєва О. С., Ножко І. В., Куценко М. А., Алексєєв А. В. До проблеми попередження пожеж на торфовищах. Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація : зб. наук. пр. Черкас. ін-ту пожеж. безпеки ім. Героїв Чорнобиля Нац. ун-ту цивіл. захисту України. 2022. Т. 6, № 1. С. 69–74.
14. Elagin G. I., Crystal D. O., Tishchenko E. O., Kutsenko M. A., Alekseeva O. S., Alekseev A. G., Zaika P. I. Physical-chemical mechanism of extinguishing and warning of fires by facilities on basis of high-porous transmitters. *Colloquium-journal*. 2024. № 11 (204), Cześć 1. P. 36–41.
15. Куценко М. А., Єлагін Г. І., Алексєєв А. В., Алексєєва О. С. Економічний ефект застосування засобів на основі вогнегасних солей, іммобілізованих пористим носієм для гасіння пожеж горючих рідин. Цивільна безпека: державне управління та кризовий менеджмент. 2022. С. 6–19.
16. Несен І. О., Куценко М. А., Єлагін Г. І., Алексєєва О. С., Нуянзін О. М., Алексєєв А. Г., Словінський В. К. Оцінка кількості шкідливих речовин в продуктах згоряння при пожежі на торфовищах, та екологічних втрат внаслідок такої пожежі. *Colloquium-journal*. 2023. № 4 (163), Cześć 1. P. 52–57.
17. Спосіб запобігання поширенню пожежі на торфовищі : пат. на корисну модель № 153448 Україна / Несен І. О. та ін. ; заявники і влас-

ники – Несен І. О., Єлагін Г. І., Алексєєва О. С., Копитін Д. Е., Нуянзін О. М., Алексєєв А. Г., Куценко М. А., Ножко І. О., Гончар С. В., Халєвко В. В. № u202300355 ; заявл. 02.02.2023; чинне з 06.07.2023. Опубл. 05.07.2023. Бюл. № 27.

18. Elagin G., Kutsenko M., Alekseev A., Nuianzin A., Alekseeva E., Crystal D., Vedula S. Development of fire prevention measures on peat plates. *The Scientific Heritage*. 2024. No. 136. P. 36–43.

REFERENCES

1. Yelagin, H. I., Tyshchenko, O. M., Alekseev, A. H., Nuianzin, V. M., & Maiboroda, A. O. (2020). Teoriia vynyknennia, rozvytku, horinnia ta vybukhu. Prypynennia horinnia [Theory of fire initiation, development, combustion and explosion. Fire suppression]. Cherkasy: ChIPB [in Ukrainian].

2. Zhartovskyi, S. V., Myroshnyk, O. M., & Tyshchenko, Ye. O. (2020). Vohnehasni poroshky ta umovy yikh zastosuvannia [Fire extinguishing powders and conditions of their use]. Cherkasy: Tretiakov O. M. Publishing [in Ukrainian].

3. Kovalyshyn, V. V., Sukach, R. Yu., & Antonov, A. V. (2019). Spetsialnyi pozhezhnyi stvol dlia hasinnia pidzemnykh pozhezh [Special fire nozzle for extinguishing underground fires] (Ukraine Patent No. 133683). Lviv State University of Life Safety [in Ukrainian].

4. Kyryliv, Ya. B., Kovalyshyn, V. V., & Sukach, R. Yu. (2019). Pozhezhna nebezpeka torfianyky, torforozrobok ta metody i zasoby pidvyshchennia efektyvnosti yikh hasinnia [Fire hazard of peatlands, peat deposits and methods and means of increasing extinguishing efficiency]. In *Nadzvychaini sytuatsii: bezpeka ta zakhyst* (pp. 59–65). Proceedings of the IX All-Ukrainian Scientific-Practical Conference with International Participation. Cherkasy: ChIPB im. Heroiv Chornobyla NUCUZ Ukrainy [in Ukrainian].

5. Bidnosheia, V. Ya., & Petrunyak, M. V. (2016). Sposib profilaktyky pozhezhonebezpechnoi ploshchi torfianoho rodovyschcha [Method for preventing fire-hazardous area of peat deposit] (Ukraine Patent No. 104989 [in Ukrainian].

6. Pozdiiev, S. V., Mygalenko, K. I., Zemlianskyi, O. M., Kutsenko, S. V., Kostyrka, O. V., Nuianzin, V. M., et al. (2019). Sposib obmezhenia rozpovsudzhenia pozhezh na torfianyakh [Method for limiting the spread of fires on peatlands] (Ukraine Utility Model No. 135418) [in Ukrainian].

7. Yelagin, H. I., Kryshchal, M. A., & Palahin, R. A. (2014). Vohnehasnyi zasib [Fire extinguishing agent] (Ukraine Utility Model No. 91400). Published 10.07.2014, Bulletin No. 13/2014 [in Ukrainian].

8. Yelagin, H. I., Yushchuk, Yu. O., & Alekseeva, O. S. (2019). Sposib vyhotovlennia vohnehasnoho zasobu [Method for producing fire extinguishing agent] (Ukraine Utility Model No. 136533). Published 27.08.2019, Bulletin No. 16/2019 [in Ukrainian].

9. Yelagin, H. I., Kutsenko, M. A., Alekseeva, O. S., Yushchuk, I. O., 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 [Technical and economic justification for the production of fire extinguishing agents for flammable liquids based on immobilized fire salts on porous carriers]. *Nadzvychaini sytuatsii: poperedzhennia ta likvidatsiia – Emergency Situations: Prevention and Response*, 3 (1), 42–50 [in Ukrainian].

10. Yelagin, H. I., Nuianzin, O. M., Tyshchenko, Ye. O., Alekseeva, O. S., & Nakonechnyi, V. V. (2020). Sposib vyhotovlennia vohnehasnoho zasobu [Method for producing fire extinguishing agent] (Ukraine Utility Model No. 141870). Published 27.04.2020, Bulletin No. 8 [in Ukrainian].

11. Kutsenko, M. A., Yelagin, H. I., Alekseev, A. V., Nakonechnyi, V. V., & Alekseeva, O. S. (2021). Obgruntuvannia tekhniko-ekonomichnoi dotsilnosti hasinnia pozhezh rozlytykh horiuchykh rehovyn zasobamy na osnovi porystykh nosiiv z immobilizovanykh vohnehasnykh rehovynamy [Technical and economic feasibility of extinguishing spilled flammable liquid fires using porous carriers with immobilized fire extinguishing substances]. *Nadzvychaini sytuatsii: poperedzhennia ta likvidatsiia – Emergency Situations: Prevention and Response*, 5 (1), 67–77 [in Ukrainian].

12. Yelagin, G., Kutsenko, M., Alekseev, A., Nuianzin, A., & Nesen, I. (2022). Extinguishing media for spilled flammable liquids. *The Scientific Heritage* (Budapest, Hungary), 1 (84), 15–25.

13. Nesen, I. O., Yelagin, H. I., Alekseeva, O. S., Nozhko, I. V., Kutsenko, M. A., & Alekseev, A. V. (2022). Do problemy poperedzhennia pozhezh na torfovyschchakh [On the problem of fire prevention in peatlands]. *Nadzvychaini sytuatsii: poperedzhennia ta likvidatsiia – Emergency Situations: Prevention and Response*, 6 (1), 69–74 [in Ukrainian].

14. Elagin, G. I., Crystal, D. O., Tyshchenko, E. O., Kutsenko, M. A., Alekseeva, O. S., Alekseev, A. G., & Zaika, P. I. (2024). Physical-chemical mechanism of extinguishing and warning of fires by facilities on basis of high-porous transmitters. *Colloquium-journal*, 11 (204), Część 1, 36–41.

15. Kutsenko, M. A., Yelagin, H. I., Alekseev, A. V., & Alekseeva, O. S. (2022). Ekonomichnyi efekt zastosuvannia zasobiv na osnovi vohnehasnykh solei, immobilizovanykh porystym nosiiem dlia hasinnia pozhezh horiuchykh ridyn [Economic effect of using fire extinguishing agents based on salts immobilized on porous carriers for extinguishing flammable liquid fires]. *Tsyvilna bezpeka: derzhavne upravlinnia ta kryzovi menedzhment – Civil Safety: Public Administration and Crisis Management*, 6–19 [in Ukrainian].

16. Nesen, I. O., Kutsenko, M. A., Yelagin, H. I., Alekseeva, O. S., Nuianzin, O. M., Alekseev, A. H., & Slovinskyi, V. K. (2023). Otsinka kilkosti shkidlyvykh rehovyn v produktakh zghoriannia pry pozhezhii na torfovyschchakh, ta ekolohichnykh vtrat vnaslidok takoi

pozhezhi [Assessment of harmful substances in combustion products during peatland fires and resulting environmental losses]. Colloquium-journal, 4 (163), Część 1, 52–57 [in Ukrainian].

17. Nesen, I. O., Yelagin, H. I., Alekseeva, O. S., Kopytin, D. E., Nuianzin, O. M., Alekseev, A. H., Kutsenko, M. A., Nozhko, I. O., Honchar, S. V., & Khaliavko, V. V. (2023). Sposib zapobihannia posh-

ynenniu pozhezhi na torfovyshchi [Method for preventing the spread of fire on peatlands] (Ukraine Utility Model No. 153448). Published 05.07.2023, Bulletin No. 27 [in Ukrainian].

18. Jelagin, G., Kutsenko, M., Alekseev, A., Nuianzin, A., Alekseeva, E., Crystal, D., & Vedula, S. (2024). Development of fire prevention measures on peat plates. The Scientific Heritage, No. 136, 36–43.

© М. А. Куценко, І. П. Романюк, О. В. Кириченко, О. В. Ніконішин, Є. В. Школяр, Р. Б. Мотрічук, С. О. Хряпак, І. І. Іщенко

Науково-методична стаття.

Стаття надійшла до редакції 15.09.2025

Стаття прийнята 01.10.2025

Статтю опубліковано 23.12.2025

DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.47.2025.08>

О. В. Лазаренко, Я. Б. Великий, Р. Ю. Сукач, В. В. Коваль
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
м. Львів, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0500-0598> – О. В. Лазаренко

<https://orcid.org/0009-0002-3241-5211> – Я. Б. Великий

<https://orcid.org/0000-0003-4174-9213> – Р. Ю. Сукач

✉ yaremavelikiy@gmail.com

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СУЧАСНОГО ЗАХИСНОГО ОДЯГУ РЯТУВАЛЬНИКА В УМОВАХ ПІДВИЩЕНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ

Вступ. Виконання задач за призначенням особовим складом оперативно-рятувальної служби практично завжди супроводжується небезпекою для життя. Особливо за умови проведення гасіння пожеж та аварійно-рятувальних робіт в огороженні, оскільки побічні чинники пожежі, як-от сильне задимлення, підвищена температура навколишнього середовища та продуктів згорання, сильне теплове випромінювання є основними причинами травмування або загибелі рятувальників. Враховуючі стандартні температурні показники розвитку пожежі в огороженні, а це близько +400–+600 °С, виробники захисного спорядження й оснащення постійно в пошуках нових більш кращих вогнетривких матеріалів та засобів, які б сприяли підвищенню безпеки та комфорту роботи пожежного.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є встановлення залежності значення допустимого часу перебування рятувальника на позиції під час виконання завдань від зміни температури підкостюмного простору захисного одягу та густини теплового потоку.

Основними задачами дослідження є здійснення аналізу сучасного екіпірування пожежного рятувальника відповідно до чинних стандартів та норм, безпосередніх експериментальних досліджень із залученням особового складу пожежних-рятувальників (газодимозахисників) з подальшим аналізом та узагальненням результатів експерименту.

Методи. Для досягнення мети роботи було проведено експериментальні дослідження з умовами, максимально наближеними до реальних (температура, теплове випромінювання). Отримані результати експериментальних досліджень було зафіксовано за допомогою повіреного обладнання та в подальшому узагальнено з використанням відповідного програмного забезпечення (Microsoft Excel).

Результати. Експериментальні дослідження підтвердили ефективність використання захисного екіпірування газодимозахисника для забезпечення безпечного й комфортного перебування в умовах підвищеної температури та теплового випромінювання. Встановлено залежність зміни температури підкостюмного простору захисного одягу, а також встановлено числові показники температури.

Висновки. Встановлено, що час захисної дії сучасного захисного одягу й екіпірування порівняно зі зразками 10–20-річної давнини є на 40 % більшим. Максимальний час перебування на позиції ствольника за умов дії надлишкового теплового випромінювання 3,9–4,2 кВт/м² і середньої температури навколишнього середовища +170 °С за мінімального середнього фізичного навантаження становитиме не більше ніж 12 хв. Також визначено, що середня температура підкостюмного простору захисного одягу за середньої температури в приміщенні +170 °С становитиме +34 °С.

Ключові слова: захисний одяг, температура підкостюмного простору, пожежа в огороженні, показник ефективності, захист пожежного, пожежна безпека.

EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS USING MODERN PROTECTIVE CLOTHING OF RESCUERS IN CONDITIONS OF ELEVATED TEMPERATURE

Introduction. The performance of tasks assigned to the personnel of the emergency rescue service is usually accompanied by danger to life. This is especially true when fighting fires and performing emergency rescue operations in enclosed spaces, as secondary factors such as heavy smoke, high ambient temperatures and combustion products, and intense heat radiation are the main causes of injury or death among rescuers. Taking into account the standard temperature indicators for fire development in enclosed spaces, which is about $+400 - +600\text{ }^{\circ}\text{C}$, manufacturers of protective equipment and gear are constantly searching for new, better fire-resistant materials and means that would increase the safety and comfort of firefighters' work.

The purpose and objectives of the study. The aim of the work is to establish the dependence of the value of the permissible time a rescuer stays in position while performing tasks on the change in the temperature of the undersuit space of protective clothing and the heat flux density.

The main objectives of the study are to analyse the current equipment used by fire and rescue personnel in accordance with applicable standards and regulations; to conduct direct experimental research involving fire and rescue personnel (gas and smoke protection specialists) followed by analysis and summarization of the experimental results.

Methods. To achieve the objective of the work, experimental studies were conducted under conditions as close as possible to real ones (temperature, thermal radiation). The results of the experimental studies were recorded using certified equipment and subsequently summarized using appropriate software (Microsoft Excel).

Results. Experimental studies have confirmed the effectiveness of using protective equipment for gas and smoke protection to ensure safe and comfortable conditions in environments with elevated temperatures and thermal radiation. The dependence of temperature changes in the space under the protective clothing has been established, and numerical temperature indicators have been determined.

Conclusions. It has been established that the protective effect of modern protective clothing and equipment is 40% greater than that of models from 10–20 years ago, and the maximum time at the gunner's position under the action of excessive heat radiation of $3.9\text{--}4.2\text{ kW/m}^2$ and an average ambient temperature of $+170\text{ }^{\circ}\text{C}$ with minimal average physical exertion will be no more than 12 minutes. It has also been determined that the average temperature of the space under the protective clothing at an average room temperature of $+170\text{ }^{\circ}\text{C}$ will be $+34\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Key words: protective clothing, undergarment temperature, fire in the enclosure, efficiency indicator, firefighter protection, fire safety.

Вступ. Виконання задач за призначенням особовим складом оперативно-рятувальної служби практично завжди супроводжується небезпекою для життя. Особливо за умови проведення гасіння пожеж та аварійно-рятувальних робіт в огороженні, оскільки побічні фактори пожежі, як-от сильне задимлення, підвищена температура навколишнього середовища та продуктів згорання, сильне теплове випромінювання, є основними причинами травмування або загибелі рятувальників [1; 2]. Для попередження отримання опіків унаслідок дії підвищеної температури чи отруєння продуктами горіння відповідно до вимог безпеки праці особовий склад повинен бути забезпечений спеціальним захисним одягом, підшоломником, захисними рукавицями, пожежною каскою тощо [3; 4]. Саме це основне екіпірування дає можливість пожежному тривалий час працювати в середовищі, де звичні засоби захисту

недієздатні. Враховуючі стандартні температурні показники розвитку пожежі в огороженні, а це близько $+400\text{--}+600\text{ }^{\circ}\text{C}$, виробники захисного спорядження й оснащення постійно в пошуках нових більш кращих вогнетривких матеріалів та засобів, які б сприяли підвищенню безпеки й комфорту роботи пожежного.

Постановка проблеми. Забезпечення особового складу засобами захисту особливо захисним одягом і спорядженням вийшло на зовсім інший рівень порівняно з минулим десятиліттями, особливо це питання актуальне для оперативно-рятувальних підрозділів ДСНС України. Так, у більшості оперативно-рятувальних підрозділів сьогодні можна зустріти захисний одяг та спорядження таких провідних брендів, як Bristol, Fenix, Viking, MSA, Rosenbauer тощо. У переважній більшості якості виконання та підходи пошиття захисного одягу пожежного в закордонних брендів

є досить схожими, практично весь захисний одяг складається з дво-, тришарового покриття, яке містить вогнетривку тканину Nomex (Aramid), вологовідвідну мембрану Gore-tex, теплоізоляційну підкладку (рис. 1), до того ж одяг може бути виконаний індивідуально та з різною кількістю шарів та підкладок.

Те ж саме стосується захисного взуття, пожежних рукавиць, підшоломників. Основною відмінністю залишаються ергономічні та якісні показники виконання того чи іншого спорядження, що, безперечно, має неостанній вплив на роботу рятувальника [6].

Свідченням зацікавленості наукової спільноти в подальшому дослідженні та покращенні показників захисту захисного одягу рятувальника є значна кількість наукових публікацій [7–14]. Зокрема, у праці [7] розглянуто альтернативні підходи та комбінації захисних шарів захисного одягу пожежних. Також запропоновано інсталяцію спеціальних капсул із хімічними речовинами, що дають змогу отримати додатковий захист у разі підвищення температури близько $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ та понизити температуру підкостюмного простору до комфортної в межах $+30\text{--}40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Водночас значна кількість наукових досліджень приділена вивченню основних стандартів та підходів оцінки якості захисного одягу, зокрема [8–11] та знов ж таки визначенню та дослідженню нових тканин і технічних рішень, що сприятимуть захисту пожежного під час виконання дій за призначеннями [11].

Вітчизняні дослідження [12–14] в переважній більшості були орієнтовані на питання безпосереднього визначення захисних властивостей зразків захисного одягу та встановлення температурних показників підкостюмного простору.

Зокрема, у роботі [12] було встановлено температурні показники підкостюмного простору пожежного за умови проведення ним робіт із фізичним навантаженням, однак за умови відсутності зовнішніх підвищених температур і додаткових факторів пожежі. Результати досліджень показали сталу температуру в межах $+30\text{--}40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Протилежні результати дослідження висвітлено в роботі [13], де вже за умов розвитку пожежі в огороженні встановлено температурні показники підкостюмного простору пожежного, але на манекені. Беручи до уваги той факт, що захисний одяг пожежного повинен здійснювати якісну терморегуляцію (відведення внутрішньої температури й одночасно захист від зовнішніх підвищених температур), більш доцільно проводити експериментальні дослідження в реальних умовах зі встановленням внутрішніх температурних режимів із залученням газодимозахисників.

Враховуючи вищезазначене, можна припустити, що ступінь захисту пожежного рятувальника на сьогодні є значно вищим за показники минулих десятиліть з огляду на те, що пожежні використовували захисний одяг з нижчими показниками захисту. Водночас висвітлені роботи показують теоретичний розрахунок та ефект захисту пожежного з використанням захисного одягу. Саме тому актуальним питанням є подальше встановлення реальних показників захисту пожежного під час виконання дій за призначенням і визначення максимального часу перебування рятувальника на позиції за умови сталих зовнішніх показників навколишнього середовища та виконання фізичного навантаження.

Постановка мети та завдань дослідження. Відповідно до аналізу наукових публікацій та останніх наукових досягнень, метою роботи

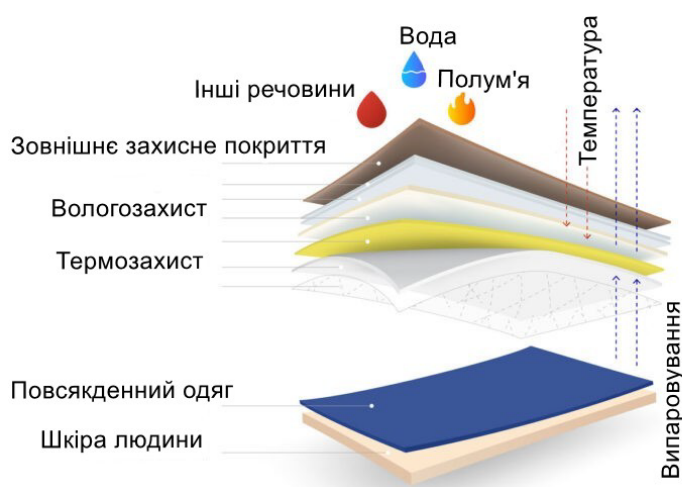


Рис. 1. Приклад виконання захисного одягу пожежного провідних брендів [5]

є встановлення залежності значення допустимого часу перебування газодимозахисника на позиції під час виконання завдань від зміни температури підкостюмного простору захисного одягу та густини теплового потоку.

Для досягнення поставленої мети потрібно:

- здійснити аналіз сучасного екіпірування пожежного рятувальника відповідно до чинних стандартів і норм;
- підготувати відповідне програмне забезпечення та матеріальну базу для проведення експериментальних досліджень;
- здійснити безпосереднє експериментальне дослідження із залученням особового складу пожежних-рятувальників з подальшим аналізом та узагальненням результатів експерименту.

Виклад основного матеріалу. Для проведення експериментальних досліджень було використано можливості дослідної лабораторії навчально-тренувального полігону Данського агентства з надзвичайних ситуацій м. Тінглев. Як основний взірць захисного одягу пожежного було вибрано наявний сучасний взірць захисного одягу пожежного провідного бренду Viking [15]. Екіпірування пожежного проводилося з максимальним дотриманням вимог щодо дотримання безпеки праці та попередження отримання опіків під час роботи в середовищі з підвищеними температурними режимами, отже, додатковий захист включав: натільну термобілизну, термостійкий підкашник Viking [15]. Додатково – захисне взуття пожежного, пожежна каска Gallet f1, захисні термостійкі пожежні рукавиці (краги).

Експериментальні дослідження визначення температурних показників підкостюмного простору захисного одягу здійснювалися в спеціально обладнаному приміщенні. Зокрема, приміщення, у якому відбувалося відтворення температурних показників, мало площу 6 м². Для пришвидшення зростання температурних показників та збільшення густини теплового випромінювання на стінах приміщення змонтовані панелі з відшліфованої сталі. Для візуального спостереження за поведінкою газодимозахисника під час досліджень по фронті перед оператором встановлено вогнетривке скло. Для нагнітання температури використовувалися два газові пальники, закриті металевим захисним кожухом, температура полум'я пальника перебувала в межах +800 °С. Пальники вмикалися циклічно й контролювалися оператором. Для контролю температурних режимів в камері використовувалися три термопари, розміщені на висоті 60, 120 та 180 см відповідно, додатково температурні показники виводилися на загальний екран в передпокої

лабораторії. Загальну схему вогневого випробування зображено на рис. 2.

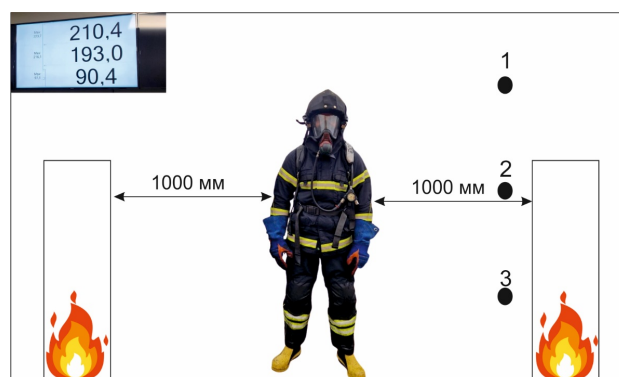


Рис. 2. Схема вогневого випробування для визначення показників підкостюмного простору захисного одягу пожежного: 1, 2, 3 – термопари на висоті 180, 120, 60 см відповідно

Для забезпечення захисту органів дихання та зору під час проведення експериментальних досліджень газодимозахисники використовували захисні дихальні апарати на стисненому повітрі.

Відповідно до задач дослідження порядок експерименту був таким:

- газодимозахисник вдягався в захисний одяг та спорядження та розміщував температурні датчики (термопари) відповідно до схеми на рис. 3;
- після чого газодимозахисник заходив у камеру вогневого (температурного) випробування;
- загалом експериментальні дослідження тривали не більше ніж 5 хвилин, упродовж випробування газодимозахисники змінювали свою позицію кожні 30 секунд. За зміною кольору лампового показника на червоний газодимозахисник повинен був присісти, лягти, встати – і так безперервно протягом усього випробування, що відповідало середньому навантаженню газодимозахисника й імітувало виконання роботи під час виконання дій за призначенням.

Загалом експериментальні дослідження було проведено за участі 10–газодимозахисників.

За результатами проведення вогневих (температурних) випробувань середня температура в приміщенні становила +170 °С (рис. 4), що відповідає середньостатистичним показникам під час розвитку пожежі в огороженні.

Додатково, враховуючи загальні температурні показники приміщення, можна розрахувати орієнтовану густину теплового випромінювання в приміщенні. Оскільки під час експериментальних досліджень була відсутня можливість здійснити безпосередній замір густини теплового потоку від пальника, для розрахунку візьмемо закон Стефана – Больцмана з визначення інтенсивності теплового



Рис. 3. Схема та порядок розміщення термодатчиків на газодимозахиснику для визначення температури підкостюмного простору захисного одягу: 1, 2 – стегнова частина ноги (голе тіло та підкостюмний простір відповідно); 3 – голова (під підшоломником); 4 – груди (підкостюмний простір); 5, 6 – передпліччя (голе тіло та підкостюмний простір відповідно)

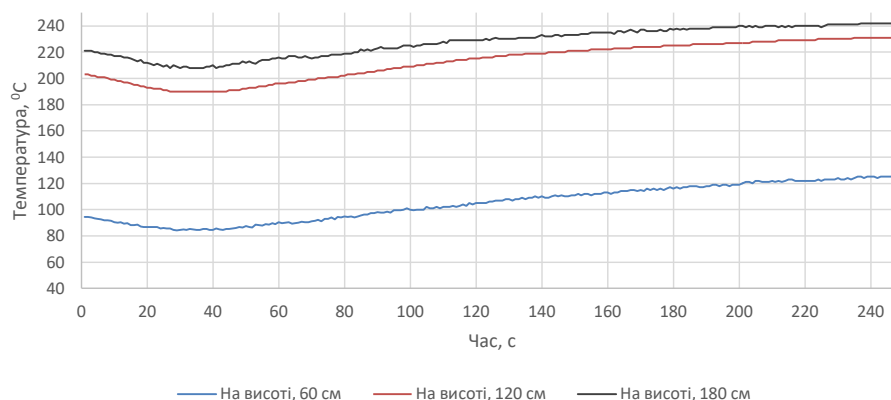


Рис. 4. Температурні показники в приміщенні під час експериментальних досліджень

випромінювання реальних предметів (1), взявши до уваги, що по всій площі приміщення інсталювані панелі з відшліфованого листового металу:

$$R = \epsilon \sigma T^4 S, \quad (1)$$

де:

R – інтегральна випромінювальна здатність абсолютно чорно тіла, (Вт/м²);

σ – постійна величина Стефана-Больцмана, ($5,67 \times 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴));

T – абсолютна температура тіла в Кельвінах;

ϵ – коефіцієнт чорноти, 0,3.

S – площа поверхні випромінювання, м².

Провівши відповідні розрахунки, можна стверджувати, що приблизна густина теплового випромінювання в приміщенні перебувала в межах 3,7–4,2 кВт/м², що загалом відповідає значенням, визначеним із використанням відповідного устаткування в роботі [13].

Результати визначення температурних показників підкостюмного простору захисного одягу наведено на рис. 5. Передусім з графічних залежностей прослідковується чітка тенденція до зростання температурних показників підкостюмного простору захисного одягу, із чого можна зробити однозначний висновок, що час перебування газодимозахисника у відповідних умовах буде обмежений. Найбільша різниця температурних показників ділянок тіла спостерігається на передпліччі, що викликано насамперед безпосередньою близькістю цієї ділянки тіла до джерела температурного й теплового випромінювання – газового пальника. Отже, максимальний температурний показник становив +40 °С. На противагу цьому найнижчий температурний показник спостерігався на нижній кінцівці (ноги) 31 °С. Решта досліджуваних ділянок (голова та груди) продемонстрували

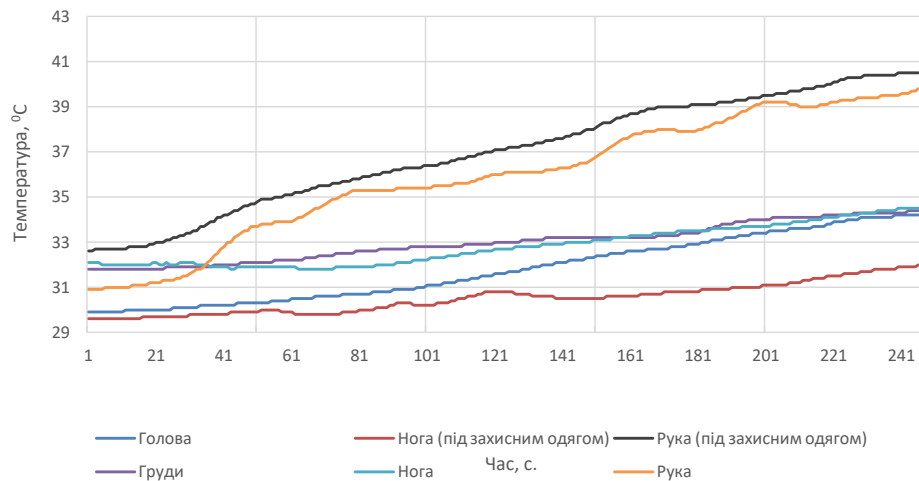


Рис. 5. Графік зміни температурних показників підкостюмного простору захисного одягу газодимозахисника під час проведення експериментальних досліджень

тенденцію до усереднення, температурний показник – близько $+30^{\circ}\text{C}$. Додатково слід зазначити, що різниця температурних показників незахищеної ділянки тіла та підкостюмного простору становила близько 2°C .

З огляду на загальну зростаючу тенденцію температурних показників було проведено апроксимацію результатів дослідження з подальшим накладанням лінії тренду й отриманням залежності, що дає змогу здійснити прогнозування зростання температурних показників підкостюмного простору газодимозахисника (рис. 6).

Оскільки найбільш сталі температурні показники зафіксовані на рівні грудей і голови, встановимо їх визначальними для визначення залежності та побудови лінії тренду. Крім того, зона грудей і голови є критично важливою для підтримання сталої внутрішньої температури тіла.

За використання програмного забезпечення Microsoft Excel вдалося встановити, що найбільш релевантною виявилася поліноміальна залежність (2)

$$y = 5E - 05x^2 - 0,0002x + 31,878, \quad (2)$$

де:

x – час, секунди; y – температура підкостюмного простору.

Використовуючи отриману залежність (2), можна змодельовати зростання показників підкостюмного простору за умови впливу експериментальних температурних показників (рис. 7). За критичну температуру встановимо показник в $+60 - 70^{\circ}\text{C}$ [16].

Враховуючи зазначене, можна стверджувати, що максимальний час перебування газодимозахисника на позиції під час виконання задач за

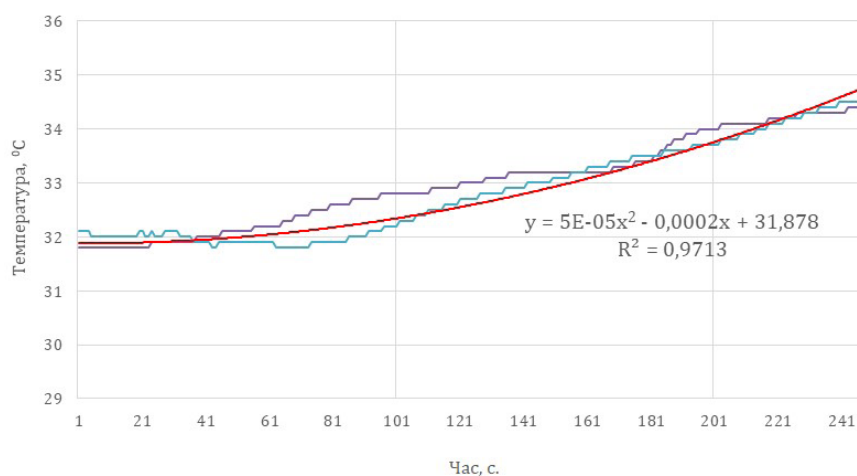


Рис. 6. Накладання поліноміальної лінії тренду на експериментальну графічну залежність температури підкостюмного простору захисного одягу

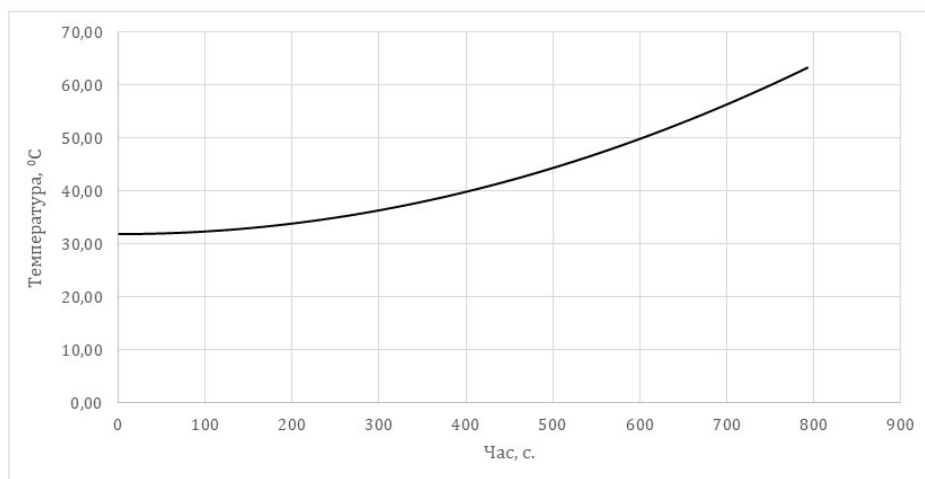


Рис. 7. Прогнозування зростання температури підкостюмного простору захисного одягу за умови дії постійної зовнішньої температури 170 °C

призначенням за зовнішньої температури +170 °C повинен становити не більше ніж 12 хв.

Розрахунки величини густини теплового випромінювання під час проведення експериментальних досліджень дають можливість здійснити попередню оцінку часу перебування рятувальника на позиції залежно від теплового навантаження, а саме 4,2 кВт/м². Таким чином, можна дати рекомендації до загальноприйнятих норм часу перебування ствольника на позиції залежно від густини теплового потоку, наведених у таблиці 1 [17].

Додатково слід зазначити, що попередні дослідження зразків захисного одягу загального призначення [13] встановлювали безпечний час експлуатації за температури навколишнього середовища +180 °C не більше ніж 345 секунд за досягнення температури підкостюмного простору +60–65 °C. Отримані результати представленого вище дослідження показують, що використання сучасного захисного одягу пожежника дає

можливість перебувати в зоні теплового впливу протягом 790 секунд до досягнення таких самих температурних показників.

Отже, збільшення часу перебування рятувальника на позиції збільшується на 445 секунд. Враховуючи неточність обрахунку, загальну похибку вимірювання в межах 10–15 % та особливо індивідуальні фізичні показники рятувальників, можна стверджувати, що отриманий результат часу перебування не можна сприймати однозначно. Однак загальний усереднений показник часу перебування рятувальника становитиме не менше ніж 567 секунд. Таким чином, можна стверджувати, що сучасне екіпірування дає змогу збільшити час перебування рятувальника (газодимозахисника) в зоні теплового впливу щонайменше на 40–60 %.

Висновки. За результатами проведення дослідження можна зробити такі висновки:

– встановлено, що час захисної дії сучасного захисного одягу й екіпірування порівняно

Таблиця 1

Залежність густин теплового випромінювання та часу перебування ствольника на позиції

Густина теплового випромінювання, кВт/м ²	Допустимий захист	Допустимий час перебування на позиції, хв
4,2	Захисний одяг і спорядження (каска, рукавиці, підшоломник)	12*
7,0	Захисний одяг і спорядження (каска, рукавиці, підшоломник)	5
8,5	Захисний одяг і спорядження (каска, рукавиці, підшоломник) та зрошення розпиленними струменями води	5
10,5	Захисний одяг в спорядження (каска, рукавиці, підшоломник) та інтенсивне зрошення розпиленними струменями води	5

Примітка: * – під час пожежі в огороженні.

зі зразками 10–20-річної давнини є більшим на 40–60 %;

– максимальний час на позиції ствольника за дії надлишкового теплового випромінювання 3,9–4,2 кВт/м² і середньої температури навколишнього середовища +170 °С з мінімальним середнім фізичним навантаженням становитиме не більше ніж 12 хв;

– середня температура підкостюмного простору захисного одягу за середньої температури в приміщенні +170 °С становитиме 34 °С.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Аналітична довідка про пожежі та їх наслідки в Україні за 12 місяців 2024 року. URL: <https://dsns.gov.ua/upload/2/3/0/1/6/1/2/analitichna-dovidka-pro-pozezi-za-12-misiaciv-2024-na-sait.pdf>.

2. Захисний одяг для пожежників. Вимоги щодо показників якості захисного одягу для пожежників : ДСТУ EN 469:2017 (EN 469:2005; A1:2006; AC:2006, IDT).

3. Про затвердження Правил безпеки праці в органах та підрозділах МНС України : наказ МНС України від 07.05.2007 № 312.

4. Болібрех Б. В., Лісняк А. А., Токарський О. І. Комплексний вплив на пожежного-рятувальника небезпечних та шкідливих факторів. *Проблеми пожежної безпеки*. 2019. № 46. С. 26–49.

5. Rethinking turnout gear for the future – International Fire Fighter. URL: <https://iffmag.com/rethinking-turnout-gear-for-the-future>.

6. Globe G-XTREME 3.0 Jacket. URL: <https://ca.msasafety.com/p/gxtremeJacket?locale=en§ion=specifications>

7. Santos G., Marques R., Marques F., Ribeiro J., Fonseca A. (2022). An innovative thermal protective clothing system for firefighters. *CDAPT*. Vol. 3 (2). P. 146–155. <https://doi.org/10.25367/cdatp.2022.3.p146-155>.

8. Santos G., Marques R., Ribeiro J., Moreira A., Fernandes P., Silva M., Fonseca A., Miranda J. M. Firefighting: challenges of smart PPE. *Forests*. 2022. Vol. 13, 1319. <https://doi.org/10.3390/f13081319>

9. He H., Liu J., Wang Y., Zha, Y., Qin Y., Zhu, Z., Yu Z., Wang J. An Ultralight Self-Powered Fire Alarm e-Textile Based on Conductive Aerogel Fiber with Repeatable Temperature Monitoring Performance Used in Firefighting Clothing. *ACS Nano*. 2022. Vol. 16. P. 2953–2967. <http://doi.org/10.1021/acsnano.1c10144>.

10. Zhang H., Liu X., Song G., Yang H. Effects of microencapsulated phase change materials on the thermal behavior of multilayer thermal protective clothing. *J. Text. Inst.* 2021. Vol. 112. P. 1004–1013. <http://doi.org/10.1080/00405000.2020.1832363>.

11. Péter Pántya, Lilla Horváth. Analysis of the material characteristics of firefighter personal protective clothing. *Hadmérnök*. 2023. Vol. 18 (2). P. 73–81. <https://doi.org/10.32567/hm.2023.2.4>.

12. Васютяк А. О., Штайн Б. В., Бойко Т. В. Дослідження температурних показників підкостюмного простору пожежника в залежності від умов середовища та фізичного навантаження. *Пожежна безпека*. 2013. № 25. С. 17–26.

13. Болібрех Б. В., Штайн Б. В., Лозинський Р. Я., Лин А. С., Васютяк А. О. Визначення температурних режимів підкостюмного простору теплозахисного одягу пожежника під час гасіння пожеж в закритих приміщеннях. *Збірник наукових праць ЛДУ БЖД «Пожежна безпека»*. 2013. № 22. С. 24–31.

14. Провести дослідження та розробити довідник керівника гасіння пожежі : звіт про науково-дослідну роботу. *Експериментальні дослідження захисного одягу пожежників*. 2016. С. 148–159. 1313 с. URL: <https://dsns.gov.ua/upload/9/6/2/3/2017-4-25-zvit-osvita-i-nauka-6-dovidnik-kerivnika-gasinnya-pozezi.pdf>.

15. Комплект захисного одягу та спорядження Viking. URL: <https://www.viking-life.com/shop/personal-protective-equipment/firefighter-protection/viking-yousafe-fire-ship-package-y2/>.

16. Wenjie Song, Fangliang Zhong, John Kaiser Calautit, Jiaxiang Li. Exploring the role of skin temperature in thermal sensation and thermal comfort: A comprehensive review. *Energy and Built Environment*. 2025. Volume 6, Issue 4. P. 762–781. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2024.03.002>

17. Коротинський П. А., Савинський С. П., Луш В. І. та ін. Довідник керівника гасіння / під ред. В. С. Кропивницького. Київ : ТОВ «Літера-Друк», 2016, 320 с.

REFERENCES

1. Analitichna dovidka pro pozhezhi ta yikh naslidky v Ukraini za 12 misiatsiv 2024 roku. (2024). [Analytical report on fires and their consequences in Ukraine for 12 months of 2024]. Retrieved from: <https://dsns.gov.ua/upload/2/3/0/1/6/1/2/analitichna-dovidka-pro-pozezi-za-12-misiaciv-2024-na-sait.pdf>. [in Ukrainian].

2. Zakhysnyi odiah dlia pozhezhnykiv. (2017). Vymohy shchodo pokaznykiv yakosti zakhysnoho odiahu dlia pozhezhnykiv: DSTU EN 469:2017 (EN 469:2005; A1:2006; AC:2006, IDT) [Protective clothing for firefighters. Requirements for quality indicators of protective clothing for firefighters]. [in Ukrainian].

3. Pro zatverdzhennia Pravyl bezpeky pratsi v orhanakh ta pidrozdilakh MNS Ukrainy: Nakaz MNS Ukrainy vid 07.05.2007 № 312. (2007). [On approval of labor safety rules in the bodies and units of the MES of Ukraine]. [in Ukrainian].

4. Bolibrukh, B. V., Lisniak, A. A., & Tokarskyi, O. I. (2019). Kompleksnyi vplyv na pozhezhnohoriatuvalnyka nebezpechnykh ta shkidlyvykh faktoriv [Complex impact of hazardous and harmful factors on a firefighter rescuer]. *Problemy pozhezhnoi bezpeky – Fire Safety Issues*, 46, 26–49. [in Ukrainian].

5. Rethinking turnout gear for the future – International Fire Fighter. Retrieved from: <https://iffmag.com/rethinking-turnout-gear-for-the-future>.
6. Globe G-XTREME 3.0 Jacket. Retrieved from: <https://ca.msasafety.com/p/gxtremeJacket?locale=en§ion=specifications>
7. Santos, G., Marques, R., Marques, F., Ribeiro, J., & Fonseca, A. (2022). An innovative thermal protective clothing system for firefighters. *CDAPT*, 3(2), 146–155. <https://doi.org/10.25367/cdatp.2022.3.p146-155>.
8. Santos, G., Marques, R., Ribeiro, J., Moreira, A., Fernandes, P., Silva, M., Fonseca, A., & Miranda, J. M. (2022). Firefighting: Challenges of smart PPE. *Forests*, 13, 1319. <https://doi.org/10.3390/f13081319>
9. He, H., Liu, J., Wang, Y., Zha, Y., Qin, Y., Zhu, Z., Yu, Z., & Wang, J. (2022). An ultralight self-powered fire alarm e-textile based on conductive aerogel fiber with repeatable temperature monitoring performance used in firefighting clothing. *ACS Nano*, 16, 2953–2967. <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c10144>.
10. Zhang, H., Liu, X., Song, G., & Yang, H. (2021). Effects of microencapsulated phase change materials on the thermal behavior of multilayer thermal protective clothing. *Journal of the Textile Institute*, 112, 1004–1013. <https://doi.org/10.1080/00405000.2020.1832363>.
11. Pántya, P., & Horváth, L. (2023). Analysis of the material characteristics of firefighter personal protective clothing. *Hadmérnök*, 18(2), 73–81. <https://doi.org/10.32567/hm.2023.2.4>.
12. Wasiutiak, A. O., Shtain, B. V., & Boiko, T. V. (2013). Doslidzhennia temperaturnykh pokaznykiv pidkostiumnoho prostoru pozhezhnika v zalezhnosti vid umov seredovyscha ta fizychnoho navantazhennia [Investigation of temperature indicators of the firefighter's under-suit space depending on environmental conditions and physical load]. *Pozhezhna bezpeka – Fire Safety*, 25, 17–26. [in Ukrainian].
13. Bolibrukh, B. V., Shtain, B. V., Lozynskyi, R. Ya., Lyn, A. S., & Wasiutiak, A. O. (2013). Vyznachennia temperaturnykh rezhymiv pidkostiumnoho prostoru teplozakhysnoho odiahu pozhezhnika pid chas hasinnia pozhezh v zakrytykh prymishchenniakh [Determination of temperature regimes of the under-suit space of firefighter thermal protective clothing during fire extinguishing in enclosed spaces]. *Pozhezhna bezpeka – Fire Safety*, 22, 24–31. [in Ukrainian].
14. Provesty doslidzhennia ta rozrobyty dovidnyk kerivnyka hasinnia pozhezh: Zvit pro naukovodoslidnu robotu. Eksperymentalni doslidzhennia zakhysnoho odiahu pozhezhnykiv [Conduct research and develop a fire commander's handbook: Research report. Experimental studies of firefighters' protective clothing]. (2016). pp. 148–159. Retrieved from: <https://dsns.gov.ua/upload/9/6/2/3/2017-4-25-zvit-osvita-i-nauka-6-dovidnik-kerivnika-gasinnya-pozezi.pdf>. [in Ukrainian].
15. Komplekt zakhysnoho odiahu ta sporiadzhennia Viking [Viking protective clothing and equipment set]. Retrieved from: <https://www.viking-life.com/shop/personal-protective-equipment/firefighter-protection/viking-yousafe-fire-ship-package-y2/>. [in Ukrainian].
16. Song, W., Zhong, F., Calautit, J. K., & Li, J. (2025). Exploring the role of skin temperature in thermal sensation and thermal comfort: A comprehensive review. *Energy and Built Environment*, 6(4), 762–781. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2024.03.002>
17. Korotynskyi, P. A., Savynskyi, S. P., Lushch, V. I., et al. (2016). Dovidnyk kerivnyka hasinnia [Fire commander's handbook] (V. S. Kropyvnytskyi, Ed.). Kyiv: TOV Litera-Druk. [in Ukrainian].

© О. В. Лазаренко, Я. Б. Великий, Р. Ю. Сукач, В. В. Коваль

Науково-методична стаття.

Стаття надійшла до редакції 20.09.2025

Стаття прийнята 05.10.2025

Статтю опубліковано 23.12.2025



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.47.2025.09>

*В.-П. О. Пархоменко, Ю. Т. Судніцин, А. М. Домінік, Р. М. Конанець,
Р. В. Пархоменко, Ю. В. Доманський
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
м. Львів, Україна*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7431-4801> – В.-П. О. Пархоменко
<https://orcid.org/0009-0002-4218-8446> – Ю. Т. Судніцин
<https://orcid.org/0000-0003-0139-2002> – А. М. Домінік,
<https://orcid.org/0000-0003-2360-4002> – Р. М. Конанець
<https://orcid.org/0009-0008-2954-6767> – Р. В. Пархоменко
<https://orcid.org/0009-0009-0330-6420> – Ю. В. Доманський
✉ pvpo2018@gmail.com

АНАЛІЗ ВИРОБНИЦТВА СКРАПЛЕНОГО ПРИРОДНОГО ГАЗУ ТА ОСНОВНИХ НЕБЕЗПЕК ДЛЯ ПОЖЕЖНО-РЯТУВАЛЬНИХ ПІДРОЗДІЛІВ

Проблема. Сучасний глобальний ринок скрапленого природного газу (СПГ) глобалізується та переживає перехідний період через технологічні інновації, зростання попиту та вплив геополітичних факторів, як-от санкції та російська агресія проти України. В Україні розвиток СПГ посилює економічний потенціал, але збільшує ризики для критичної інфраструктури, включно з низкою небезпек для особового складу пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС України під час ліквідації пожеж і надзвичайних ситуацій (НС) на об'єктах зі зберігання та його виробництва. Також відсутній чіткий алгоритм дій для особового складу пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС України під час ліквідації НС і пожеж на об'єктах зі зберігання та виробництва СПГ, правил безпеки праці для особового складу під час таких оперативних дій та застосування сучасних технологій для проведення оперативних дій на таких об'єктах.

Мета – проаналізувати технологічний процес СПГ, визначити параметри зберігання в різних типах ємностей та їх характеристики, а також основні види небезпек для пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС України на об'єктах виробництва, транспортування та зберігання СПГ.

Методи дослідження. Дослідження проведено аналітичним методом з обробкою наукових публікацій, експериментальних даних, звітів міжнародних організацій щодо глобальних тенденцій ринку СПГ, класифікації технологій зберігання, її характеристик, моделювання визначення типів небезпек на об'єктах з виробництва, транспортування та зберігання СПГ, з якими може стикнутись особовий склад пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС України.

Основні результати дослідження. Відповідно до аналізу звітів міжнародних організацій глобальний ринок СПГ зріс на 2,4 % у 2024 року до 411,24 млн т; експортна потужність Північної Америки подвоїться до 28,7 млрд куб. футів/добу до 2029 р.; інвестиції з 2019 р. по жовтень 2025 р. – становили 380 млрд куб. м/рік. За результатами аналізу методичних матеріалів та інтернет-ресурсів визначено, що виробництво СПГ є багатостадійним процесом (очищення, осушення, охолодження). Зберігання: напівізотермічне (криогенні резервуари 3–350 м³) та ізотермічне (одинарні, подвійні, мембранні, сферичні, заглиблені). Основні небезпеки технологічного процесу: низька температура зберігання СПГ в резервуарах, до –160 °С та можливе займання СПГ. Основні види небезпек, з якими може стикнутись особовий склад пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС України під час ліквідації пожеж чи надзвичайних ситуацій на цих об'єктах: тепловий вплив від пожежі (1000–1400 °С, > 50 кВт/м²), вибухова хвиля (зони до 1100 м), факельне горіння, розливи, крижаний вибух. Транспортування додає ризики аварій, під час яких можуть виникнути вищеперелічені небезпеки й термічні опіки від низької температури СПГ.

Висновки. Ринок СПГ демонструє стає зростання, здебільшого завдяки розширенню потужностей у Північній Америці, США та Катарі. Однак це супроводжується підвищеними ризиками для критич-

ної інфраструктури, що робить об'єкти СПГ потенційними цілями для атак. Виробництво СПГ – це багатостадійний процес, з поділом об'єктів за тоннажністю. Зберігання здійснюється в криогенних резервуарах за температури $-162\ldots-165\text{ }^{\circ}\text{C}$.

СПГ, як криогенна, легкозаймиста речовина, несе ризики пожеж, вибухів, розливів та утворення пароповітряних хмар. Ключові сценарії небезпек включають тепловий вплив (температури $1000\text{--}1400\text{ }^{\circ}\text{C}$, потоки $> 50\text{ кВт/м}^2$), вибухові хвилі (зони руйнувань до 1100 м), факельне горіння, горіння розлитого СПГ та «крижані вибухи» з утворенням хвиль стиснення. Транспортування (авто, залізниця, морське) додає ризики аварій, обморожень та взаємодії з водою, що посилює випаровування.

У подальшому для розвитку цієї тематики перспективним було б сформувати детальний алгоритм дій особового складу пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС України для ліквідації НС на об'єктах з переробки, зберігання та транспортування СПГ, надати рекомендації для вибору вогнегасних речовин, безпеки особового складу за можливих повторних обстрілів на об'єктах і застосування сучасного обладнання для розвідки та гасіння пожеж.

Ключові слова: скраплений природний газ, надзвичайна ситуація, гасіння пожеж СПГ.

*V.-P. O. Parkhomenko, Yu. T. Sudnitsyn, A. M. Dominik, R. M. Konanets,
R. V. Parkhomenko, Yu. V. Domanskyi
Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine*

ANALYSIS OF LIQUEFIED NATURAL GAS PRODUCTION AND MAJOR HAZARDS FOR FIRE AND RESCUE UNITS

Introduction. The modern global LNG market is undergoing rapid globalisation and a transitional period driven by technological innovations, rising demand, and geopolitical factors, including sanctions and Russia's full-scale aggression against Ukraine. In Ukraine, the development of LNG significantly strengthens economic potential and energy independence, but it simultaneously increases risks to critical infrastructure, creating a range of hazards for personnel of the State Emergency Service of Ukraine (SESU) during firefighting and emergency response at LNG storage and production facilities. Moreover, there is currently no clear operational algorithm for SESU personnel in managing emergencies and fires at LNG storage and production sites, no specific occupational safety rules for personnel during such operations, and no guidelines for the use of modern technologies in conducting emergency response at these facilities.

Purpose. To analyze the LNG technological process, determine the parameters of storage in different types of containers and their characteristics, as well as the main types of hazards for the fire and rescue units of the State Emergency Service of Ukraine at LNG production, transportation, and storage facilities.

Methods. The research was conducted using analytical methods with the processing of scientific publications, experimental data, reports of international organizations on global trends in the LNG market, classification of storage technologies, their characteristics, modeling of hazard types, at LNG production, transportation, and storage facilities that may be encountered by personnel of the fire and rescue units of the State Emergency Service of Ukraine.

Results. According to the analysis of reports from international organizations, the global LNG market grew by 2.4% in 2024 to 411.24 million tonnes; North America's export capacity is expected to double to 28.7 billion cubic feet per day by 2029; investments from 2019 to October 2025 amount to 380 billion cubic metres per year. An analysis of methodological materials and online resources has shown that LNG production is a multi-stage process (purification, dehydration, cooling). Storage is divided into semi-isothermal (cryogenic tanks of $3\text{--}350\text{ м}^3$) and isothermal (single-containment, double-containment, membrane, spherical, and buried tanks). The main technological hazards are the extremely low storage temperature of LNG in tanks (down to $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$) and the possibility of ignition. The primary hazards that personnel of the State Emergency Service of Ukraine (SESU) fire and rescue units may face during firefighting or emergency response at these facilities include: thermal radiation from fires ($1000\text{--}1400\text{ }^{\circ}\text{C}$, $> 50\text{ кВт/м}^2$), blast waves (damage zones up to 1100 м), jet fires, spills, and ice explosions. Transportation introduces additional accident risks that can trigger all the above hazards, as well as cryogenic burns from the low temperature of LNG.

Conclusions. The LNG market demonstrates steady growth, primarily driven by the expansion of capacities in North America, the USA, and Qatar. However, this is accompanied by increased risks to critical infrastructure, making LNG facilities potential targets for attacks. LNG production involves a multi-stage process, with facilities classified by tonnage. Storage is carried out in cryogenic tanks at temperatures of $-162\text{ to }-165\text{ }^{\circ}\text{C}$.

As a cryogenic and highly flammable substance, LNG poses risks of fires, explosions, spills, and the formation of vapour-air clouds. Key hazard scenarios include thermal radiation (temperatures $1000\text{--}1400\text{ }^{\circ}\text{C}$, heat fluxes $> 50\text{ кВт/м}^2$), blast waves (damage zones up to 1100 м), jet fires, pool fires from spilled LNG, and "ice explosions" generating compression waves. Transportation (road, rail, maritime) adds risks of

accidents, cryogenic burns, and rapid phase transition upon contact with water, which intensifies vaporisation.

For further development of this topic, it would be promising to formulate a detailed operational algorithm for personnel of the State Emergency Service of Ukraine (SESU) fire and rescue units for responding to emergencies at LNG processing, storage, and transportation facilities; to provide recommendations on the selection of extinguishing agents, personnel safety during possible repeated shelling of facilities, and the use of modern equipment for reconnaissance and fire suppression.

Key words: liquefied natural gas (LNG), emergency situations, fire extinguishing LNG.

Постановка проблеми. Сучасний газовий ринок дедалі більше глобалізується та переживає безперервний перехідний період після тривалого періоду адаптації та десятиліття, повного технологічних інновацій, які вплинули на весь ланцюг постачання, від видобутку до транспортування та розподілу. Тенденція до збільшення попиту на світовому ринку скрапленого природного газу підтверджується аналітичними звітами країн Європейського Союзу (ЄС) [1; 3], де наведено дані щодо експорту та перспектив щорічного виробництва СПГ у світі до 200 тонн на рік.

Однак на його розвиток і динаміку спричиняють вплив глобальні тенденції економічного та геополітичного характеру, дія непрогнозованих факторів, як-от пандемічні обмеження, впровадження санкцій, спричинених повномасштабною російською агресією проти України. Стрімкий розвиток ринку малотоннажного СПГ на території нашої держави є позитивним фактором для збільшення економічного потенціалу України як у мирний період, так і під час воєнного стану в Україні [4–7].

Однак зі значним поширенням використання СПГ збільшується і кількість небезпек,

які можуть нести об'єкти зі зберігання та його транспортування. Оскільки ці об'єкти [8; 9] є важливими для критичної інфраструктури України, існує додаткова небезпека ударів з боку країни-агресора. Тому для особового складу пожежно-рятувальних підрозділів Державної служби України з надзвичайних ситуацій (ДСНС України) вивчення аналізу безпеки об'єктів зі зберігання та транспортування СПГ має цінну практичну складову.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивченням стану пожежної безпеки об'єктів зберігання та транспортування СПГ присвячено ряд наукових праць. Так, у роботі [10] висвітлено дослідження безпеки вибуху сферичних резервуарів підприємств нафтогазопереробної промисловості, де автори виділяють типи можливих аварій під час розгерметизації таких резервуарів та обґрунтовують зони дії надлишкового тиску вибуху у сферичному резервуарі з бутадієном, зокрема, зона повних руйнувань і смертельного ураження персоналу становить 90 м, зона отримання травм різного ступеня важкості – до 230 м, а безпечна відстань – понад 250 м.

Дослідження проблематики безпеки на газонаповнювальних пунктах розглянуто в роботі

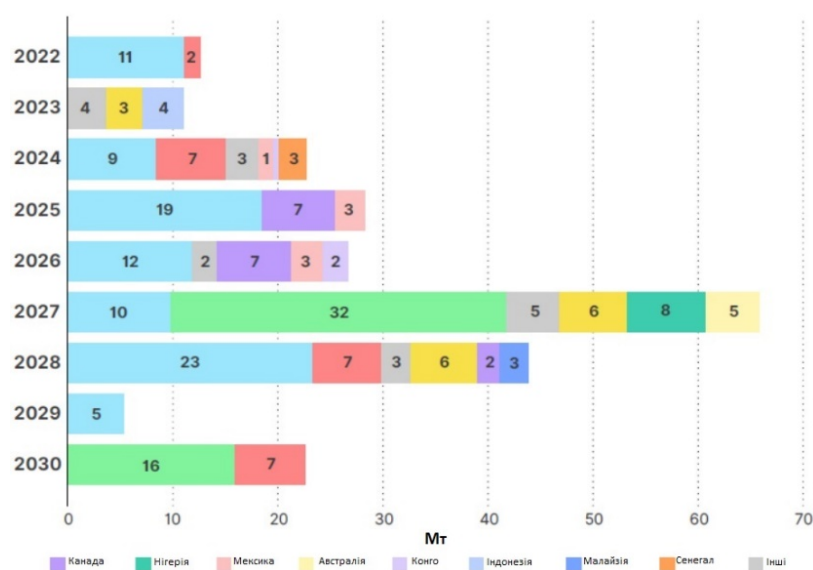


Рис. 1. Динаміка розвитку СПГ у світі до 2030 року

[11], де автори проводять аналіз енергетичного потенціалу й рівня небезпеки об'єктів газонаповнювальних пунктів, призначених для приймання СПГ із залізничних цистерн і автоцистерн, зберігання і його відвантаження. У роботі проведено розрахунок показників вибухонебезпеки (вибуху пароповітряної суміші) залізничної цистерни із СПГ місткістю 60 м³, а саме енергетичний і відносний енергетичний потенціал вибухонебезпеки, загальну приведену масу горючої пари та тритиловий еквівалент. Ці результати слугують основою для вирішення питань безпечної експлуатації об'єктів, пов'язаних із СПГ.

У роботі [12] проаналізовано технологічні аспекти видобутку та зрідження природного газу в морських прибережних акваторіях за допомогою автономних плавучих заводів, підкреслено їх переваги над традиційними береговими установками, як-от зменшення витрат на інфраструктуру й уникнення довгих підводних трубопроводів. Основні результати вказують на доцільність модульного підходу до будівництва цих заводів, де основні роботи виконуються на верфях, а збірка модулів відбувається безпосередньо на платформах, що скорочує час проєктування та підвищує ефективність, при цьому акцент робиться на мінімізації розмірів обладнання для обмеженого простору суден.

У роботі [13] представлено оцінку безпеку процесів змішаного каскадного зрідження (ЗКЗ) у чотирьох фазах для СПГ за допомогою комплексного індексу вродженої безпеки та моделювання їх наслідків. Згідно з результатами, двоцикловий процес ЗКЗ-2 виявився найбезпечнішим варіантом, тоді як трицикловий ЗКЗ-4, що

вважається сучасною технологією, посів друге місце. Основними вразливими елементами в усіх процесах визнані багатопотокові теплообмінники та компресори, а моделювання потенційних аварій показало, що струменева пожежа в ЗКЗ-4 може створити зону ураження радіусом 21,8 м у разі втрати герметичності. Результати корисні для розробників технологій та інженерів підприємств зі зберігання СПГ, оскільки підкреслюють необхідність посилення шарів захисту для зменшення ризиків.

Мета статті – провести аналіз технологічного процесу циклів СПГ; визначити параметри зберігання СПГ у різних типах ємностей, їх особливості та характеристики; визначити основні види небезпек для особового складу пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС України, які можуть бути на об'єктах із виробництва, транспортування та зберігання СПГ.

Виклад основного матеріалу. Згідно з даними Міжнародного газового союзу [14], глобальна торгівля скрапленим природним газом зросла на 2,4 % у 2024 році, досягнувши 411,24 млн тонн, що свідчить про стале збільшення виробництва й експорту, попри обмежену нову потужність. Це зростання обумовлене розширенням зріджувальних потужностей, зокрема в Північній Америці, де експортна потужність очікується подвоїтися з 11,4 млрд куб. футів на добу на початку 2024 року до 28,7 млрд куб. футів на добу до 2029 року [1]. З 2019 р. по жовтень 2025 р. було ухвалено рішення про інвестиції майже в 380 млрд куб. м/рік нової експортної потужності, що становить середньорічний приріст близько 55 млрд куб. м, переважно за реалізації проєктів у США та Катарі [2].

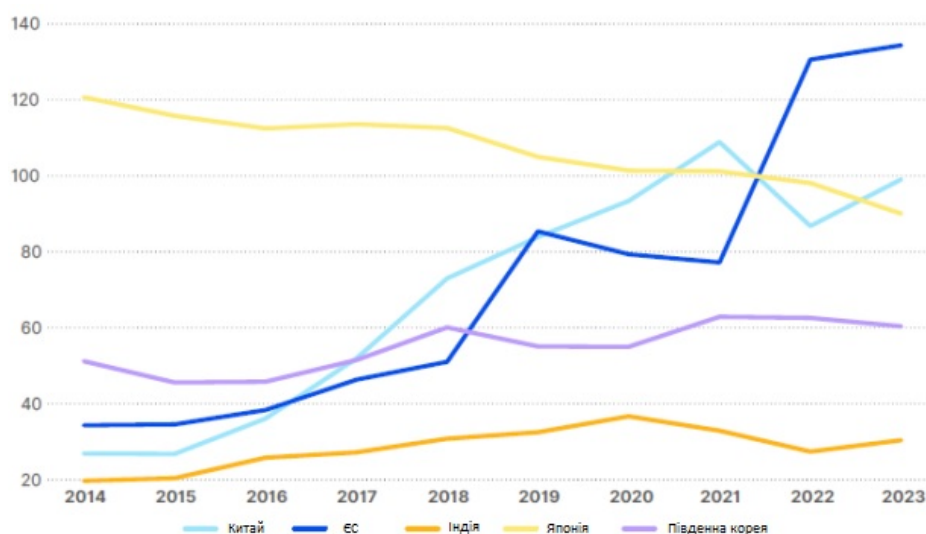


Рис. 2. Графік розподілу експорту СПГ найбільшими експортерами світу

Об'єкти зберігання та переробки СПГ являють собою високоспеціалізовані промислові комплекси, призначені для здійснення операцій з імпорту / експорту, зберігання, регазифікації (конверсії СПГ у газоподібну фазу) та подальшого розподілу природного газу. Ці комплекси охоплюють різноманітні типи терміналів, зокрема для пікового регулювання навантаження, термінали для забезпечення паливом транспортних засобів, резервуари для зберігання СПГ та ряд інших будівель і споруд, що забезпечують роботу цих об'єктів. Зазвичай такі споруди розміщуються в безпосередній близькості від портових зон або ключових транспортних вузлів з метою оптимізації логістики постачання СПГ. Вони забезпечують надійне зберігання СПГ за умов криогенних температур у спеціально ізольованих резервуарах, а також реалізують процеси переробки для інтеграції газу в існуючі трубопровідні мережі [15].

Об'єкти зберігання та переробки СПГ належать до пожежовибухонебезпечних об'єктів, де навіть незначні інциденти можуть призвести до аварійних ситуацій з подальшими вибухами пароповітряних хмар, викидами парової та рідкої фаз, розливами та горінням СПГ.

Виробництво СПГ базується на виробничо-збутовому циклі, що передбачає виробництво, зберігання, транспортування, регазифікацію та споживання, яке поділяється на кілька технологічних операцій (рис. 4).

Виробництво скрапленого природного газу являє собою складний багастадійний процес, що передбачає очищення, осушення й охолодження природного газу.

Перша технологічна операція в комплексі зі скраплення природного газу складається з очищення сировинного газу шляхом видалення домішок, наприклад води,



Рис. 3. Загальний вигляд об'єкту зберігання та переробки СПГ на прикладі підприємства Tokyo GAS Negishi LNG в м. Йокохама, Японія

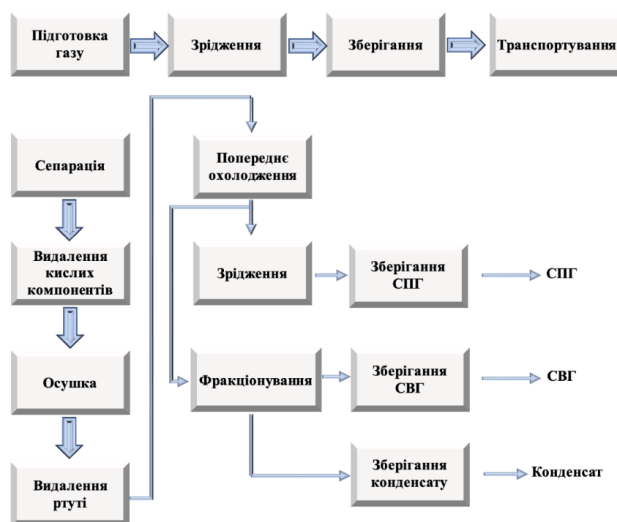


Рис. 4. Схема технологічного процесу виробництва СПГ

кислих газів (вуглекислого газу та сірчистого газу) і ртуті.

Друга технологічна операція – це видалення важких вуглеводнів або легкого конденсату в газо-фракційній установці.

В останній технологічній операції газ, який тепер являє собою переважно метан, надходить в основний потік газу через кріогенні теплообмінники, де він скраплюється шляхом охолодження приблизно до мінус 160 °С [16; 17].

Після скраплення СПГ поставляється в промислове сховище СПГ, з якого здійснюється відвантаження газу. Зі сховища СПГ газ відвантажується в кріоцистерни або танк-контейнери для відвантаження споживачеві.

Залежно від продуктивності установок скраплення і специфіки споживачів об'єкти СПГ умовно поділяються на великотоннажні, середньотоннажні й малотоннажні. Масштаб виробництва багато в чому визначає призначення, розміщення та розміри виробничих установок, технологічні процеси підготовки і скраплення газу, засоби транспортування СПГ, розміщення й розмір установок регазифікації.

Однією з відмінних рис об'єктів малотоннажного виробництва від об'єктів великотоннажного є наявність безпосередньо на об'єкті пунктів реалізації виробленої продукції. До складу об'єкта можуть входити як майданчики зливу-наливу СПГ з резервуарів у кріогенні пересувні автогазозаправники, так і кріогенний паливозаправний пункт для заправки транспортних засобів СПГ.

Існують різні конструктивно-технологічні схеми зберігання – напівізотермічне й ізотермічне

зберігання. Загальною характеристикою резервуарів для зберігання СПГ є здатність зберігати газ за температури на рівні мінус 165–162 °С.

До кріогенних належать резервуари, призначені для накопичення, зберігання під надлишковим тиском, транспортування та видачі споживачеві кріогенної рідини (напівізотермічне зберігання).

До ізотермічних належать резервуари для зберігання великих обсягів СПГ за температури кипіння йв тиску, близькому до атмосферного, що складаються з концентрично розташованих внутрішнього і зовнішнього сталевих корпусів, класифікація яких представлена на рис. 5.

Усі види резервуарів для зберігання СПГ являють собою подвійні контейнери, де внутрішня частина перебуває в контакті з СПГ і виконується з холодостійкої сталі, зовнішня оболонка може виконуватися з вуглецевої сталі. Простір між оболонками заповнюється ізоляційними матеріалами.

Розмір стаціонарних ємностей для зберігання СПГ, що пропонуються на ринку, сильно диференційований залежно від сфери застосування.

Стаціонарні резервуари СПГ експлуатуються у складі систем:

- зрідження природного газу;
- сховищ СПГ;
- резервуарів зберігання та видачі СПГ у складі АЗС СПГ;
- систем автономного й резервного теплоенергозабезпечення з використанням СПГ.

Напівізотермічне зберігання здійснюється у двошарових резервуарах СПГ і резервуарах СПГ в кожусі, які мають істотну відмінність за конструктивним виконанням, а саме:



Рис. 5. Класифікація стаціонарних сховищ для зберігання СПГ

– двошаровий резервуар для зберігання СПГ обладнаний термоізоляційним кожухом, призначений для забезпечення вакуумної ізоляції і забезпечує в разі розгерметизації робочої (внутрішньої) посудини утримання в міжстінному просторі рідкої фази СПГ і контрольоване скидання парів СПГ в атмосферу із зазначеного простору через скидну трубу (труби) технологічної системи АЗС.

Кріогенні резервуари можуть бути встановлені в технологічній лінії зі скраплення газу, в системах АЗС СПГ або в системах резервного енергозабезпечення. Кріогенні резервуари можуть мати як горизонтальне, так і вертикальне виконання (рис. 6).

Конструкції виконуються двостінними з екранно-вакуумною або порошково-вакуумною ізоляцією. Об'єм таких резервуарів становить від 3 до 350 м³, робочий тиск – 0,2–3,7 МПа.

Ізотермічні резервуари для зберігання скраплених газів за температури кипіння та тиску, близькому до атмосферного, класифікують за обсягом продукту, що зберігається, за кількістю контурів утримання аварійного розливу продукту, що зберігається (перешкод для вільного розливу рідкого продукту) і за конструктивним виконанням даху внутрішнього корпусу.

За обсягом (місткістю) продукту, що зберігається, ізотермічні резервуари поділяють на три основні типи:

- малотоннажні – об'єм продукту менше ніж 5000 м³;
- середньотоннажні – об'єм продукту від 5000 м³, але менше за 60 000 м³;
- великотоннажні – від 60 000 м³ і вище.

За кількістю контурів стримування можливого аварійного розливу продукту ізотермічні резервуари поділяють на три основні типи:

1) «одинарного утримання», містить:

– внутрішній силовий корпус, розрахований на стримування гідростатичного тиску рідини;

– зовнішній герметичний корпус, розрахований на стримування надлишкового тиску газу над рідиною, але не розрахований на аварійний розлив продукту;

2) «подвійного утримання», містить:

– силовий корпус;

– відкриту захисну огорожувальну стінку (або закриту навісом від попадання атмосферних опадів), розраховану на стримування аварійного розливу продукту по території підприємства;

3) – «повного стримування», містить два силові корпуси, концентрично розташовані один в одному, кожен з яких призначений для стримування гідростатичного тиску рідини:

– зовнішній корпус герметичний і розрахований на стримування тиску газу;

– внутрішній корпус може бути як герметичним, тобто мати власний герметичний стаціонарний дах, так і негерметичним і виготовлятися з паропроникним підвісним дахом, закріпленим на підвісках до даху зовнішнього корпусу ізотермічного резервуара.

Ізотермічні резервуари за конструктивним виконанням даху внутрішнього корпусу поділяють на два основні типи:

- з купольним самонесучим герметичним дахом внутрішнього корпусу;
- з підвісним паропроникним дахом внутрішнього корпусу.

Низькотемпературне зберігання СПГ здійснюють у підземних, заглиблених і надземних ізотермічних резервуарах, конструкції яких принципово відрізняються від конструкцій широко



а



б

Рис. 6. Резервуари для зберігання невеликих обсягів СПГ у (а) вертикальному і (б) горизонтальному виконанні

застосовуваних резервуарів для зберігання нафти та нафтопродуктів із використанням холодостійких матеріалів і наявністю теплоізоляції.

Усі типи ізоtermічних резервуарів для зберігання СПГ можуть мати два види конструкцій дахів:

- самонесучий (купольний) дах,
- підвісний плоский дах.

Підвісний дах кріпиться до кроkv стаціонарного зовнішнього даху за допомогою підвісок.

Згідно з вищевказаними характеристиками ізоtermічні резервуари для зберігання СПГ класифікуються таким чином:

- одинарні ізоtermічні резервуари,
- подвійні ізоtermічні резервуари,
- двошарові ізоtermічні резервуари,
- мембранні ізоtermічні резервуари.

Одинарний резервуар складається лише з одного (первинного) контейнера, який являє собою стійкий циліндричний резервуар із холодостійкої сталі та призначений для зберігання рідкого продукту (рис. 7). Зовнішня оболонка одинарного резервуара не здатна утримувати продукт, а призначена тільки для захисту ізоляції від атмосферних впливів [18].

Оскільки тільки внутрішня оболонка одинарного резервуара може витримати гідростатичний тиск СПГ, то в разі її пошкодження продукт витече назовні. Для утримання можливих розливів СПГ одинарний резервуар оточується захисною дамбою.

Двостінний резервуар складається з непроникного для рідини і парів первинного контейнера, що являє собою одинарний сталевий або бетонний резервуар, укладений всередині відкритого зверху, але непроникного для рідини вторинного контейнера. Вторинний контейнер проєктується таким чином, щоб повністю утримувати рідкий

вміст первинного контейнера в разі його протікання.

Вторинний контейнер відкритий зверху, а отже, не здатний утримувати пари продукту. Простір між первинним і вторинним контейнерами може накриватися «дощовим щитом» для запобігання потрапляння дощової води, снігу, бруду тощо.

Двошаровий резервуар закритого типу складається з первинного (внутрішнього) і вторинного (зовнішнього) контейнерів, які разом утворюють єдиний резервуар-сховище.

Внутрішня ємність може бути відкритою зверху або мати підвісний дах для утримання парів продукту.

Зовнішня ємність може бути виконана як вільнотривчий сталевий або залізобетонний резервуар, оснащений купольним дахом і розрахований на комбіноване виконання таких функцій.

За стандартної експлуатації резервуара – утримувати в собі термоізоляцію первинного контейнера і в разі первинного контейнера з відкритим верхом слугувати в ролі первинної парової герметизації резервуара.

У разі розгерметизації первинного контейнера вторинний повинен повністю утримувати продукт і зберігати паронепроникність конструкції.

Допускається контрольований викид парів в атмосферу системою скидання тиску. Міжстінний простір між первинним і вторинним контейнерами не повинен перевищувати 2,0 м.

Мембранний резервуар складається з тонколистового сталевий первинного контейнера (мембрани) з термоізоляцією і залізобетонного резервуара, що утворюють разом єдину складову конструкцію, яка забезпечує зберігання рідини.

Первинний контейнер (мембрана), що контактує з СПГ, являє собою оболонку, що складається з гофрованих у двох взаємно перпендикулярних

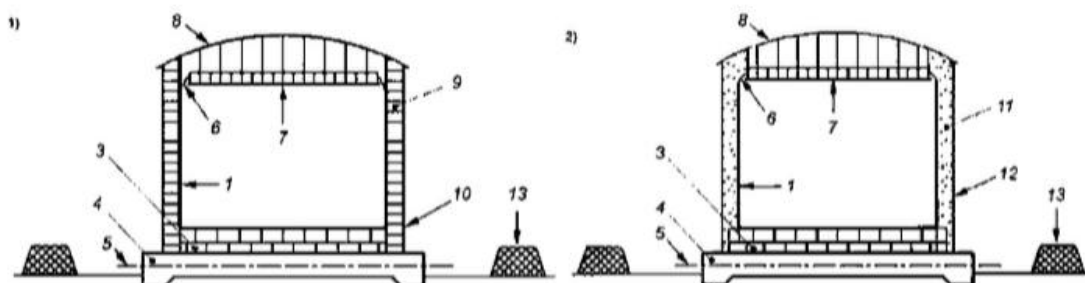


Рис. 7. Приклади резервуарів з одинарною оболонкою: 1 – первинний контейнер (сталевий), 3 – ізоляція дна, 4 – фундамент, 5 – система обігріву фундаменту, 6 – гнучке ізоляційне ущільнення, 7 – підвісне перекриття (ізольоване), 8 – дах (сталевий), 9 – зовнішня ізоляція оболонки, 10 – зовнішня водо- та пароізоляція, 11 – засипна ізоляція, 12 – зовнішня сталева оболонка (нездатна утримувати рідину), 13 – захисна дамба

напрямах листів нержавіючої сталі товщиною не менше ніж 1,2 мм. Ортогональні гофри компенсують температурні деформації, що робить мембрану нечутливою до теплових навантажень. Мембранна оболонка кріпиться на внутрішню сторону зовнішньої залізобетонної оболонки через шар ізоляції. Усі гідростатичні навантаження з мембрани передаються через ізоляцію на залізобетонний резервуар.

Пари утримуються дахом резервуара, який може мати таку ж складову конструкцію або являти собою газонепроникний купольний дах з ізоляцією на висячому даху.

Одним із видів наземних резервуарів є сферичні резервуари. Їхня куляста форма сприяє рівномірному розподілу напружень у стінках, мінімізує площу поверхні для зменшення теплового обміну з навколишнім середовищем та забезпечує компактність розміщення, що робить їх ефективними для промислових об'єктів з обмеженою територією. Серед основних характеристик – висока стійкість до слошингу (коливанню рідини) за часткового заповнення, завдяки чому можлива експлуатація в умовах морських платформ, а також об'єм від 500 до 3000 м³ для подвійних конструкцій, що забезпечує безпеку та надійність. Будова типового сферичного резервуара складається з алюмінієвої або сталевий оболонки, підтримуваної циліндричною опорою через перехідний з'єднувальний елемент, з ізоляцією на зовнішній поверхні для зменшення тепловтрат; у подвійних варіантах внутрішній резервуар (товщиною 20 мм) розміщується всередині зовнішнього (товщиною 12 мм), з міжшаровим простором, заповненим перлітовим піском та азотом для термоізоляції, а також спільною опорною колоною, розділеною на секції для мінімізації теплопередачі. Додаткові елементи структури охоплюють

рельєфні клапани, системи пожежогасіння, процесні з'єднання, внутрішні опори для ізоляції та фундамент на бетонній основі для стабільності [19].

Різновидом наземних ізотермічних резервуарів є металеві вертикальні циліндричні резервуари, заглиблені частково або повністю в ґрунт. Конструктивно такі резервуари принципово не відрізняються від наземних мембранних резервуарів (рис. 9).

Дахи заглиблених і підземних резервуарів можуть бути двох типів:

- підвісна платформа (рис. 9, а);
- купольний дах з внутрішньою ізоляцією (рис. 9, б).

Аналогічно наземним мембранним ізотермічним резервуарів гофрована мембрана заглибленого резервуара забезпечує зберігання продукту й компенсацію температурних напружень, а ізоляція із жорсткого пінополіуретану обмежує проникнення тепла ззовні та передає внутрішні напруження з мембрани на зовнішню залізобетонну плиту.

Корпус підземних резервуарів піддається зовнішньому впливу ґрунту та води, тому залізобетон, що має високу межу міцності на стиск, є ідеальним матеріалом.

Для обмеження промерзання ґрунту навколо цього резервуара вбудовується контур із гарячою водою. Підземне розташування резервуара скорочує інтенсивність теплопритоків з атмосфери. Усі типи заглиблених і підземних резервуарів мають високий рівень безпеки. Підземні резервуари більш стійкі до сейсмічних коливань, що робить їх більш безпечними в районах, схильних до землетрусів. У разі аварійної розгерметизації резервуара весь СПГ залишиться нижче рівня землі [20].

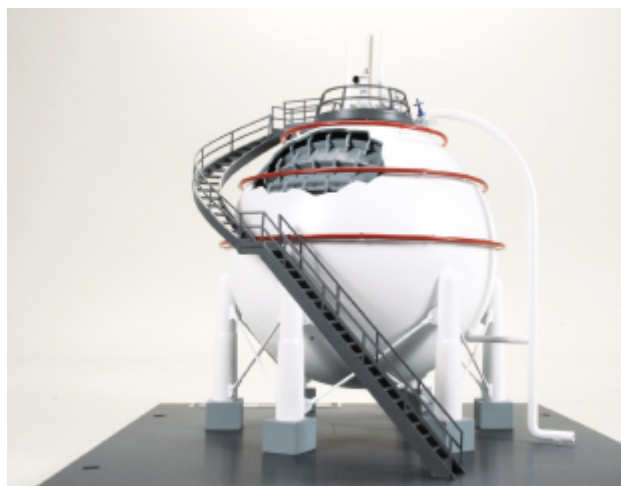


Рис. 8. Приклад кулястого резервуару для зберігання СПГ

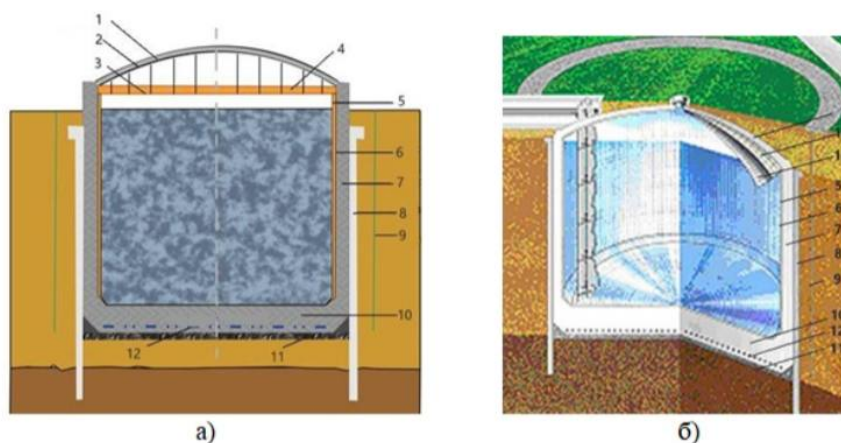


Рис. 9. Приклади заглибленого (а) і підземного (б) резервуарів:

1 – залізобетонний дах, 2 – сталевий дах, 3 – підвісна платформа, 4 – теплоізоляція зі скловати, 5 – тверда поліуретанова ізоляція, 6 – мембрана з нержавіючої сталі, 7 – залізобетонна стінка, 8 – залізобетонна шпунтова стінка, 9 – бічний підігрівач, 10 – залізобетонне дно, 11 – основа з гравію, 12 – підігрівач основи, 13 – ізоляція даху, 14 – мембрана даху

Потенційна небезпека під час поводження з СПГ переважно обумовлена трьома його важливими властивостями:

- СПГ – криогенна рідина. За атмосферного тиску залежно від складу СПГ кипить за температури приблизно мінус 160 °С. За цієї температури пари СПГ мають більшу щільність, ніж навколишнє повітря;

- невеликі обсяги рідини перетворюються на великі обсяги газу. З одного об'єму СПГ утворюється 600 об'ємів газу;

- природний газ, як і інші газоподібні вуглеводні, є легкозаймистою речовиною. В умовах навколишнього середовища концентраційні межі займання суміші парів СПГ з повітрям становлять приблизно від 5 до 15 % за об'ємом газу. У разі накопичення газу в замкнутому просторі займання може призвести до детонації та ударної хвилі внаслідок надлишкового тиску.

Під час розгляду фізико-хімічних властивостей і показників вибухонебезпечності СПГ слід враховувати, що на практиці зазвичай доводиться мати справу з двофазною системою «рідина – газ (пара)».

Транспортування СПГ є також однією з важливих ланок виробництва, що відіграє значну роль, оскільки більшість надзвичайних ситуацій виникають у процесі саме транспортування. Транспортування може здійснюватися різними методами. Найбільш використовуваним є транспортування за допомогою наземного транспорту та водного транспорту.

Розглядаючи наземний транспорт, можна відокремити два найбільш використовувані види: залізничний та автомобільний. Основні небезпеки під час перевезення цим транспортом утворюються через властивості зрідженого газу, а саме високу займистість, можливість вибухового розширення



Рис. 10. Схематичне зображення життєвого циклу СПГ від підприємства до споживача

газу. Також важливим аспектом виникнення надзвичайної ситуації є можливість потрапляння транспорту в аварії, які будуть призводити до займання та вибухів. У цьому випадку надзвичайні ситуації супроводжуватимуться як людськими жертвами, так і необхідністю залучення великої кількості техніки та особового складу [21–23].

Інша річ, коли йдеться про морські судна, як і в разі застосування наземного транспорту, зріджений газ несе небезпеку можливого займання та вибуху. Однак виникають додаткові небезпеки, наприклад кріогенна. Зріджений газ перевозиться за надзвичайно низьких температур, під час витоку можливе обмороження людей, а також конструктивних елементів судна, що призведе до крихкості матеріалів та подальшого їх руйнування. Також виникає проблема із взаємодією газу та води. Під час взаємодії вода прискорює випаровування газу, що може призвести до вибуху. Отже, в оперативно-рятувальній служби виникатимуть проблеми із залученням техніки, організацією ліквідації витоку, високим тепловим випромінюванням, викидом токсичних речовин продуктів згорання. Керівнику гасіння потрібно проводити постійний моніторинг території розливу газу та площі пожежі [24–27].

У разі розгерметизації обладнання та виходу СПГ в атмосферу внаслідок високої швидкості випаровування можуть утворюватися пароповітряні хмари великих розмірів, що залежать від кількості газу, який миттєво вийшов, або швидкості витікання, а також кліматичних умов (атмосферного тиску, швидкості вітру, температури та вологості повітря).

Найбільш імовірною причиною аварійного витоку продукту є порушення герметичності обладнання через недотримання технологічного процесу та несправності протиаварійних систем і пристроїв. Займання відбувається зазвичай від стороннього джерела запалювання, оскільки максимальна температура продукту нижча за температуру самозаймання.

Пожежі на об'єктах зберігання та переробки СПГ характеризуються можливістю прояву в різному поєднанні таких небезпечних сценаріїв:

- теплового впливу пожежі;
- впливу вибухової хвилі;
- факельного горіння палаючого газу;
- горіння розлитого СПГ;
- крижаного вибуху.

Тепловий вплив пожежі. Пожежі скрапленого природного газу створюють інтенсивне теплове випромінювання від великого, яскравого полум'я, що становить небезпеку для людей й споруд здалеку. Орієнтовний температурний режим становить 1000–1400 °С, але на деяких ділянках можливі й більші температури. Пожежі СПГ створюють здебільшого локальні теплові потоки, що на певних відстанях можуть становити та навіть перевищувати значення від 4 до 10–кВт/м² – усе залежатиме від відстані, площі пожежі та вітру [27]. Стандартний захисний одяг пожежного-рятувальника в середньому захищає від дії температури в межах від –40 до –185 °С та теплових потоків до 50 кВт/м² за умови нетривалого перебування.

Основними загрозами під час високих теплових потоків для рятувальників ДСНС є термічні



Рис. 11. Зображення пожежних-рятувальників під час ліквідації займання СПГ та їх захисту від теплового впливу

опіки. Отже, керівнику гасіння пожежі слід забезпечити безпечну відстань для гасіння пожежі від осередку полум'я або використовувати спеціалізований захисний одяг від підвищених теплових впливів, на кшталт тепловідбивного костюму, який за своїми характеристиками витримує температури до 1000 °C та теплові потоки понад 50 кВт/м² [28].

Вплив вибухової хвилі. Вибухова хвиля від скрапленого природного газу може спричинити значні руйнування будівель і конструкцій, а також призвести до значних жертв. Вона може виникнути в разі витоку легкозаймистої речовини, утворюючи хмару та пароповітряну суміш, яка, зі свого боку, взаємодіє з джерелом запалення. Для особового складу пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС України основними небезпеками можуть бути:

- високий тиск на органи та тканини тіла;
- уламки, які виникають під час вибуху;
- термічні опіки в разі виникнення вогняних куль і близького перебування до місця її виникнення.

Керівнику гасіння пожежі потрібно постійно контролювати процес гасіння, чи не виникає витоку газів, а також своєчасно приймати рішення

щодо негайної евакуації особового складу із зони можливого ураження від вибуху [29].

Факельне горіння палаючого газу. Під час пожеж скрапленого природного газу на трубопроводах, запірній арматурі тощо можливе виникнення факельного горіння. Основною небезпекою факельного горіння газу є висока температура. Найефективнішим методом гасіння буде контрольоване самовигорання, якщо відсутня небезпека займання сусідніх будівель і споруд. Факел генерує інтенсивне теплове випромінювання, що може призвести до термічних опіків. Також існує загроза вибуху у випадку різкого викиду газу, що створює загазованість і пароповітряну суміш, яка має властивість вибухати в разі контакту з джерелом займання. Під час гасіння керівник має організовувати охолодження резервуарів, запірних арматур тощо. Також можливе наближення рятувальників за використання розпилювальних струменів водяних стволів високої витрати, що створюють водяну завісу, захисний екран. Наблизившись впритул, рятувальники мають можливість провести необхідні дії для швидкої ліквідації події, наприклад перекрити витік водню, збити полум'я з використанням порошкового вогнегасника тощо [30; 31].



Рис. 12. Зображення наслідків аварії на підприємстві зі зберігання СПГ після вибухової хвилі та займання



Рис. 13. Зображення факельного горіння СПГ



Рис. 14. Зображення пожежних-рятувальників під час ліквідації займання розлитого СПГ

Горіння розлитого СПГ. Горіння розлитого газу поширює пожежу на велику площу, відбувається викид великого теплового потоку, а також токсичних продуктів згорання [25; 32]. Ці загрози створюють для рятувальників значні труднощі під час ліквідації пожежі. Керівнику гасіння пожежі потрібно правильно побудувати тактику гасіння пожежі, врахувавши необхідну кількість засобів для гасіння; забезпечити особовий склад тепло-відбивним костюмами, оскільки цей тип пожежі супроводжуватиметься високими температурними режимами та тепловими потоками, а також передбачити можливі сценарії погіршення процесу гасіння, наприклад вибух, факельне горіння газу тощо.

Крижаний вибух. У разі витоку рідкого метану в атмосферу він закипає і поступово переходить у газоподібний стан. Унаслідок конденсації утворюється добре видимий білий туман. СПГ

спочатку поширюється по землі, оскільки за температури нижче мінус 135 °С він важчий за повітря. Поступово СПГ нагрівається, що призводить до зменшення його щільності. У разі загоряння таких хмар може відбуватися їх швидке згоряння без вибуху у вигляді спалаху або згоряння з вибухом з утворенням хвилі стиснення (рис. 15).

Спалювання з вибухом з утворенням хвилі стиснення може відбутися, коли пароповітряною хмарою охоплені захаращені ділянки території (напівзамкнуті обсяги, технологічне обладнання з високою щільністю розміщення, лісові масиви), а також унаслідок попадання в хмару відкритих довгих труб, порожнин, каверн.

У разі розгерметизації технологічного обладнання, у якому скраплений газ перебуває під тиском, утворюються пароповітряні струмені, загоряння яких призводить до утворення віялових струменевих факелів, а також струменевих



Рис. 15. Зображення пожежних-рятувальників під час ліквідації крижаного вибуху



Рис. 16. Зображення поширення хмари СПГ по місту в Північній Кореї та її займання

факелів, близьких до осиметричних. Вплив таких факелів, що мають часто велику довжину, на обладнання призводить до його пошкодження і залучення до горіння все більшої кількості газу.

За теплового впливу струменевого факела або палаючого проливу на резервуари зі скрапленням природним газом можливе їх руйнування з утворенням вогняних куль із великими радіусами смертельного ураження людей тепловим випромінюванням. У момент вибуху може виникнути реактивна поведінка самого резервуара, тобто переміщення резервуара на значну відстань із високою швидкістю. Реалізація цього сценарію можлива в разі відмови дихальної арматури резервуара [33].

Висновки. Ринок СПГ демонструє стале зростання (збільшення торгівлі на 2,4 % у 2024 році до 411,24 млн тонн), здебільшого завдяки розширенню потужностей у Північній Америці, США та Катарі. В Україні розвиток малотоннажного СПГ сприяє посиленню економічного потенціалу й енергетичної незалежності, особливо в умовах геополітичних викликів, як-от російська агресія та санкції. Однак це супроводжується підвищеними ризиками для критичної інфраструктури, що робить об'єкти СПГ потенційними цілями для атак.

Виробництво СПГ є багатостадійним процесом (очищення, осушення, охолодження до -160°C), з поділом об'єктів на великотоннажні, середньотоннажні та малотоннажні. Зберігання здійснюється в напівізотермічних (криогенних) та ізотермічних резервуарах різної конструкції (одинарних, подвійних, мембранних, сферичних, заглиблених), що забезпечують підтримку низьких температур ($-162\ldots-165^{\circ}\text{C}$) і тиску. Ці системи мінімізують теплові втрати, але вимагають суворого дотримання норм безпеки для запобігання розгерметизації.

СПГ, як криогенна, легкозаймиста речовина (межі займання 5–15 % у повітрі) несе ризики пожеж, вибухів, розливів та утворення

пароповітряних хмар. Ключові сценарії передбачають тепловий вплив (температура $1000\text{--}1400^{\circ}\text{C}$, потоки $> 50\text{ кВт/м}^2$), вибухові хвилі (зони руйнувань до 1100 м), факельне горіння, горіння розлитого СПГ та «крижані вибухи» з утворенням хвиль стиснення. Транспортування (авто, залізниця, морське) додає ризики аварій, обморожень і взаємодії з водою, що посилює випаровування. Аналіз літератури показує значний енергетичний потенціал вибухів (наприклад, тротилловий еквівалент 7578 кг для цистерни 60 м^3).

У подальшому для розвитку цієї тематики перспективним було б сформулювати детальний алгоритм дій особового складу пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС України для ліквідації НС на об'єктах із переробки, зберігання та транспортування СПГ, адже чинна нормативна база не є повною та не забезпечує необхідною інформацією, на яку керівник гасіння пожежі чи НС повинен опиратись. Також потрібно надати рекомендації щодо вибору вогнегасних речовин, безпеки особового складу за можливих повторних обстрілів на об'єктах і застосування сучасного обладнання для розвідки та гасіння пожеж.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Analysis of the European LNG market developments. 2024 Market Monitoring Report. ACER. European Union Agency for the Cooperation of Energy Regulators. 2025. 50 p. URL: https://www.acer.europa.eu/monitoring/MMR/LNG_market_developments_2024.
2. Overview of the Global LNG market: Supply & Demand Dynamics. *LNG Protocol*. 2025. 12 p. URL: <https://www.eurogas.org/wp-content/uploads/2025/04/LNG-Protocol-Brochure-12-pages.pdf>.
3. Keliauskaitė U., McWilliams B., Sgaravatti G., Zachmann G. European natural gas imports. *Bruegel*. 2025. URL: <https://www.bruegel.org/dataset/european-natural-gas-imports>.
4. Бабічев А. В., Рахматіл्लाєва К. Б. Динаміка та перспективи розвитку світового ринку природ-

ного газу. *Проблеми економіки : зб. наук. праць*. Харків : НДЦПР НАН України. 2025. № 1 (63). С. 12–18. <https://doi.org/10.32983/2222-0712-2025-1-12-18>.

5. Скидан О., Кільницька О., Яремова М., Старунська А. Регулювання цін на паливно-енергетичні ресурси як напрям зміцнення соціально-економічної та енергетичної безпеки Екранії. *Сталий розвиток економіки : зб. наук. праць*. Хмельницький : УЕіП. 2023. № 2 (47). С. 216–225. <https://doi.org/10.32782/2308-1988/2023-47-31>.

6. Морозова І. Особливості сучасного світового ринку скрапленого природного газу. *Економіка та суспільство : зб. наук. праць*. Одеса : ВД «Гельветика». 2025. № 76. С. 1–10. <https://doi.org/10.3278/2524-0072/2025-76-24>.

7. Ярошевич М. А. Суспільно-географічні аспекти формування Східноєвропейського газового хабу : автореф. дисертації на здобуття наукового ступеня канд. географ. Наук : 11.00.02. Львів, 2020. 23 с. URL: https://lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2020/11/dis_yaroshevych.pdf.

8. Про критичну інфраструктуру : Закон України від 16.11.2021 № 1882-ІХ. *Відомості Верховної Ради України*. 2023. № 5, с. 31, стаття 13. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20#Text>.

9. Zaniewicz M., Moiseienko D. Ukraine's energy sector is a key battleground in the war with Russia. *Brooking*. 2025. URL: <https://www.brookings.edu/articles/ukraines-energy-sector-is-a-key-battleground-in-the-war-with-russia/>.

10. Ференц Н. О., Вовк С. Я., Лин А. С., Харішин Д. В. Дослідження небезпеки вибуху сферичних резервуарів підприємств нафтогазопереробної промисловості. *Пожежна безпека : зб. наук. праць*. Львів : ЛДУ БЖД, 2019. № 34. С. 91–95. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.34.2019.15>.

11. Чернова О. Т., Кривенко Г. М. Аналіз небезпек на газонаповнювальних пунктах. *Екологічні науки : зб. наук. праць*. Київ : ДЗ «ДЕАПОтаУ», АЕН України, 2020. № 4 (31). С. 120–124. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.4-31.19>.

12. Заблоцький Ю. В., Будашко В. В., Сагін А. С. Забезпечення технологічних операцій зі зрідженим природним газом під час його видобутку в морських прибережних акваторіях. *Автоматизація суднових технічних засобів : зб. наук. праць*. Одеса : НУ ОМА, 2024. № 29. С. 54–65. <https://doi.org/10.3165/3/1819-3293-2024-1-29-54-65>.

13. Narimani M., Baradaran S., Sobati M. Inherent safety assessment and consequence analysis of the Liquefied Natural Gas (LNG) Mixed Fluid Cascade (MFC) processes. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2024. Vol. 10. 100943. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100943>.

14. World LNG Report. *International Gas Union (IGU)*. London. UK. 2025. 167 p. URL: https://www.datocms-assets.com/146580/1751026179-igu-world-lng-report-2025-hr_dp_c.pdf.

15. Technical Evidence and Safety and Risk Assessment. The European Union's TEN-T programme LNG Masterplan for Rhine-Main-Danube. *LNG Masterplan Consortium*. 2015. 140 p. URL: https://www.danubecommission.org/uploads/doc/Presentations/2015/TWMG%2004-2015/04%20-%20Seitz%20-%202015-04-10_LNG.pdf.

16. Дьяченко Т. В. Транспортування та збереження зрідженого природного газу : навчальний посібник. Одеса : Освіта України, 2017. 106 с. URL: <http://ntit.ontu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/56/2018/05/Dyachenko-T.V.-Transportuvannya-ta-zberezhennya-zhridzhenogo-prirodnogo-gazu.pdf>.

17. LNG Bunkering: Technical and Operational Advisory. *ABS*. 68 p. URL: https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/advisories-and-debriefs/ABS_LNG_Bunkering_Advisory.pdf.

18. Sarmiento E. C. Diseño de Tanques de Almacenamiento de Gas Natural Licuado (GNL). Dep. de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla. Sevilla, Spain, 2018. 98 p. URL: <https://ereding.etsi.us.es/bibing/proyectos/abreproy/91735/fichero/TFG-1735-COBO.pdf>.

19. LNG Spherical Storage Tank Model. Oil & Gas Maintenance Training Aid. *DAC Worldwide*. US. 2021. URL: <https://dacworldwide.com/product/lng-spherical-storage-tank-training-aid/>.

20. Hydrogen, LNG Storage Tanks (Underground) Hydrogen, LNG Power Plant & Terminal. *Lloyds Engineering*. US. 2022. URL: <https://www.lloydseng.com/lng-storage-underground>.

21. Frittelli John, Parfomak Paul W. Rail Transportation of Liquefied Natural Gas: Safety and Regulation. *Congressional Research Service*. 2020. 25 p. URL: <https://www.congress.gov/crs-product/R46414>.

22. Emergency Response Guidebook. US Department of Transportation. 2024. 392 p. URL: <https://www.phmsa.dot.gov/sites/phmsa.dot.gov/files/2024-04/ERG2024-Eng-Web-a.pdf>.

23. NFPA 58 Liquefied Petroleum Gas Code. 2020. <https://misafecanna.com/wp-content/uploads/2021/09/NFPA-58-20-LPG.pdf>.

24. Pagonis D. N., Livanos G., Theotokatos G., et al. Open-type ferry safety system design for using LNG fuel. *J. Marine. Sci. Appl.* 15, 2016. P. 405–425. URL: <https://doi.org/10.1007/s11804-016-1386-2>.

25. Iannaccone T., Scarponi G., Jeong B., Cozzani V. Assessment of LNG Fire Scenarios on Board of LNG-Fuelled Ships. *Chemical Engineering Transactions (CET)*. 2021. Vol. 86. 6 p. URL: <https://doi.org/10.3303/CET2186065>.

26. Galieriková A., Kalina T., Sosedová J. Threats and risks during transportation of LNG on European inland waterways. *Transport Problems*. 2017. Vol. 12 (1). P. 73–81. <https://doi.org/10.20858/tp.2017.12.1.7>.

27. Dalaklis D. LNG Bunkering Accident Response. *GLBE 2021: The Global LNG Bunkering*

Experience. 2021. 45 p. URL: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12419.22564>.

28. Hang Yi, Sam Wang Evaluation of LPG Pool Fire Heat Flux – A Literature Review. *Fire Protection Research Foundation*. US. 2017. 44 p. URL: <https://www.nfpa.org/education-and-research/research/fire-protection-research-foundation/projects-and-reports/evaluation-of-lpg-pool-fire-heat-flux>.

29. Bohacikova V. Key lessons from LNG incidents for safer operations. *GEXCON*. URL: <https://www.gexcon.com/resources/blog/key-lessons-from-lng-incidents-for-safer-operations/>.

30. Berrouane M. T., Louni Z. Safety assessment of flare systems by fault tree analysis. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2016. Vol. 51 (2). P. 12–17. URL: https://www.researchgate.net/publication/295092114_Safety_assessment_of_flare_systems_by_fault_tree_analysis.

31. Лазаренко О. В., Пархоменко В.-П. О., Сукач Р. Ю., Білоножко Б. В., Кусковець А. С. Конструктивні особливості та небезпека автомобілів на водневому паливі. *Пожежна безпека : зб. наук. праць*. Львів : ЛДУ БЖД. 2020. № 37. С. 52–57. URL: <https://doi.org/10.32447/20786662.37.2020.08>.

32. Pérez J., Correa S., Vicario J., Mayo C. Final Report on Training on Firefighting & LNG. Document № MONALISA 2.0_D4.6.6. 24 p. URL: <https://stm-stmvalidation.s3.eu-west-1.amazonaws.com/uploads/20160420153049/ML2-D4.6.6-Training-LNG-Firefighting.pdf>.

33. Dalaklis D. Best Fire-fighting Practices for LNG Bunkering Operations. *Maritime Safety, Health and Environment 2016 Conference*. Nyborg, Denmark. 2016. 45 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/307906918_Best_Fire-fighting_Practices_for_LNG_Bunkering_Operations.

REFERENCES

1. ACER. (2025). European Union Agency for the Cooperation of Energy Regulators. Analysis of the European LNG market developments. 2024 Market Monitoring Repor. 50. Retrieved from: https://www.acer.europa.eu/monitoring/MMR/LNG_market_developments_2024.

2. LNG Protocol. (2025). Overview of the Global LNG market: Supply & Demand Dynamics. 12. Retrieved from: <https://www.eurogas.org/wp-content/uploads/2025/04/LNG-Protocol-Brochure-12-pages.pdf>.

3. Keliauskaitė, B., Sgaravatti G., Zachmann G. (2025). European natural gas imports. Bruegel. Retrieved from: <https://www.bruegel.org/dataset/european-natural-gas-imports>.

4. Babichev, A. V., Rakhmatillaieva, K. B. (2025). Dynamika ta perspektyvy rozvytku svitovoho rynku pryrodnoho hazu [Dynamics and Prospects of the Development of the Global Natural Gas Market]. *Problemy ekonomiky: zb. nauk. prats. Kharkiv: NDTsIPR NAN Ukrainy*, 1 (63), 12–18. <https://doi.org/10.32983/2222-0712-2025-1-12-18>. [in Ukrainian].

5. Skydan, O., Kilnitska, O., Yareмова, M., Starunskа, A. (2023). Rehuliuвання tsin na palyvno-enerhetychni resursy yak napriam zmitsnennia sotsialno-ekonomichnoi ta enerhetychnoi bezpeky Ukrainy [Regulation of prices for fuel and energy resources as a direction of strengthening socio-economic and energy security of Ukraine]. *Stalyi rozvytok ekonomiky. Khmelnytskyi. UEiP*. 2 (47), 216–225. <https://doi.org/10.32782/2308-1988/2023-47-31>. [in Ukrainian].

6. Morozova, I. (2025). Osoblyvosti suchasnoho svitovoho rynku skraplenoho pryrodnoho hazu [Features of the modern global liquefied natural gas market]. *Ekonomika ta suspilstvo*. Odesa: VD “Helvetyka”. 76, 1–10. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-76-24>. [in Ukrainian].

7. Yaroshevych, M. A. (2020). Social and geographical aspects of the Eastern European Gas Hub formation. *Doctor's thesis*. Lviv. Retrieved from: https://lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2020/11/dis_yaroshevych.pdf. [in Ukrainian].

8. Verkhovna Rada of Ukraine (2021). Pro krytychnu infrastrukturu: Zakon Ukrainy vid 16.11.2021 № 1882-IX. [About critical infrastructure. Law of Ukraine from November 16, 2021 No. 1882-IX]. (2023) *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy*, 5, 31. Art. 13. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20#Text>. [in Ukrainian].

9. Zaniewicz, M., Moiseienko, D. (2025). Ukraine's energy sector is a key battleground in the war with Russia. *Brooking*. Retrieved from: <https://www.brookings.edu/articles/ukraines-energy-sector-is-a-key-battleground-in-the-war-with-russia/>.

10. Ferents, N. O., Vovk, S. Ya., Lyn, A. S., Kharyshyn, D. V. (2019). Doslidzhennia nebezpeky vybukhu sferychnykh rezervuariv pidpriemstv naf-tohazoperobnoi promyslovosti [Explosive hazard of spherical tanks of oil and gas refining enterprises]. *Pozhezhna bezpeka*. Lviv. LDU BZhD. 34, 91–95. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.34.2019.15>. [in Ukrainian].

11. Chernova, G. M. (2020). Analiz nebezpek na hazonapovniuvannykh punktakh [Danger analysis at gas filling stations]. *Ekolohichni nauky*. Kyiv. DZ “DEAPOtaU”. AEN Ukrainy. 4 (31), 120–124. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.4-31.19>. [in Ukrainian].

12. Zablotskyi, Y. V., Budashko, V. V., Sagin, A. S. (2024). Zabezpechennia tekhnolohichnykh operatsii zi zridzhenym pryrodnyim hazom pid chas yoho vydobutku v morskykh pryberezhnykh akvatoriiakh [Ensuring technological operations with liquefied natural gas during its production in coastal sea water areas]. *Avtomatyzatsiia sudnovykh tekhnichnykh zasobiv*. Odesa. NU OMA. 29, 54–65. <https://doi.org/10.31653/1819-3293-2024-1-29-54-65>. [in Ukrainian].

13. Narimani, M., Baradaran, S., Sobati, M. (2024). Inherent safety assessment and consequence analysis of the Liquefied Natural Gas (LNG) Mixed Fluid Cascade (MFC) processes. *Case Studies in Chemical and*

Environmental Engineering, 10, 100943. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100943>.

14. World LNG Report. International Gas Union (IGU). (2025). London. UK. 167. Retrieved from: https://www.datocms-assets.com/146580/1751026179-igu-world-lng-report-2025-hr_dp_c.pdf.

15. Technical Evidence and Safety and Risk Assessment (2015). The European Union's TEN-T programme LNG Masterplan for Rhine-Main-Danube. *LNG Masterplan Consortium*, 140. Retrieved from: https://www.danubecommission.org/uploads/doc/Presentations/2015/TWMG%2004-2015/04%20-%20Seitz%20-%202015-04-10_LNG.pdf.

16. Dyachenko, T. V. (2017). Transportuvannya ta zberezhennia zridzhenoho pryrodnoho hazu [Transportation and storage of liquefied natural gas]. Odesa: Osvita Ukrainy. 106. Retrieved from: <http://ntit.ontu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/56/2018/05/Dyachenko-T.V.-Transportuvannya-ta-zberezhennia-zhridzhenogo-prirodnogo-gazu.pdf>. [in Ukrainian].

17. ABS. (2021). LNG Bunkering: Technical and Operational Advisory. 68. Retrieved from: https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/advisories-and-debriefs/ABS_LNG_Bunkering_Advisory.pdf.

18. Sarmiento, E. C. (2018). Diseño de Tanques de Almacenamiento de Gas Natural Licuado (GNL). Dep. de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla. Sevilla, Spain. 98. Retrieved from: <https://ereding.etsi.us.es/bibing/proyectos/abreproy/91735/fichero/TFG-1735-COBO.pdf>.

19. LNG Spherical Storage Tank Model. Oil & Gas Maintenance Training Aid. DAC Worldwide. US. Retrieved from: <https://dacworldwide.com/product/lng-spherical-storage-tank-training-aid/>.

20. Hydrogen, LNG Storage Tanks (Underground) Hydrogen, LNG Power Plant & Terminal. Lloyds Engineering. US. Retrieved from: <https://www.lloydseng.com/lng-storage-underground>.

21. Frittelli John, Parfomak Paul. (2020). Rail Transportation of Liquefied Natural Gas: Safety and Regulation. Congressional Research Service. 25. Retrieved from: <https://www.congress.gov/crs-product/R46414>.

22. US Department of Transportation. (2024). Emergency Response Guidebook. 392. Retrieved from: <https://www.phmsa.dot.gov/sites/phmsa.dot.gov/files/2024-04/ERG2024-Eng-Web-a.pdf>.

23. NFPA 58. (2020). Liquefied Petroleum Gas Code. p. Retrieved from: <https://misafecanna.com/wp-content/uploads/2021/09/NFPA-58-20-LPG.pdf>.

24. Pagonis, D., Livanos, G., Theotokatos, G., et al. (2016). Open-type ferry safety system design for using LNG fuel. *J. Marine. Sci. Appl.* 15. 405–425. <https://doi.org/10.1007/s11804-016-1386-2>.

25. Iannaccone, T., Scarponi, G., Jeong, B., Cozzani, V. (2021). Assessment of LNG Fire Scenarios on Board of LNG-Fuelled Ships. *Chemical Engineering Transactions (CET)*. Vol. 86. 6. <https://doi.org/10.3303/CET2186065>.

26. Galieriková, A., Kalina T., Sosedová J. (2017). Threats and risks during transportation of LNG on European inland waterways. *Transport Problems*, 12 (1), 73–81. <https://doi.org/10.20858/tp.2017.12.1.7>.

27. Dalaklis, D. (2021). LNG Bunkering Accident Response. GLBE 2021: The Global LNG Bunkering Experience. 45. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12419.22564>.

28. Hang, Yi, Sam, Wang. (2017). Evaluation of LPG Pool Fire Heat Flux – A Literature Review. Fire Protection Research Foundation. US. 44. Retrieved from: <https://www.nfpa.org/education-and-research/research/fire-protection-research-foundation/projects-and-reports/evaluation-of-lpg-pool-fire-heat-flux>.

29. Bohacikova, V. Key lessons from LNG incidents for safer operations. GEXCON. Retrieved from: <https://www.gexcon.com/resources/blog/key-lessons-from-lng-incidents-for-safer-operations/>.

30. Berrouane, M., Louni, Z. (2016). Safety assessment of flare systems by fault tree analysis. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 51 (2), 12–17. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/295092114_Safety_assessment_of_flare_systems_by_fault_tree_analysis.

31. Lazarenko, O. V., Parkhomenko, V-P. O., Sukach, R. Yu., Bilonozhko, B. V., Kuskovets, A. S. (2020). Konstruktyvni osoblyvosti ta nebezpeka avtomobiliv na vodnevomu palyvi [Design features and hazards of hydrogen fuel cell cars]. *Pozhezhna bezpeka*. Lviv. LDU BZhD. 37, 52–57 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32447/20786662.37.2020.08>.

32. Pérez, J., Correa, S., Vicario, J., Mayo, C. Final Report on Training on Firefighting & LNG. Document № MONALISA 2.0 D4.6.6. 24 p. Retrieved from: <https://stm-stmvalidation.s3.eu-west-1.amazonaws.com/uploads/20160420153049/ML2-D4.6.6-Training-LNG-Firefighting.pdf>.

33. Dalaklis, D. (2016). Best Fire-fighting Practices for LNG Bunkering Operations. *Maritime Safety, Health and Environment 2016 Conference*. Nyborg, Denmark. 45. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/307906918_Best_Fire-fighting_Practices_for_LNG_Bunkering_Operations.

© В.-П. О. Пархоменко, Ю. Т. Судніцин, А. М. Домінік, Р. М. Конанець,
Р. В. Пархоменко, Ю. В. Доманський

Оглядова стаття.

Стаття надійшла до редакції 10.09.2025

Стаття прийнята 05.10.2025

Статтю опубліковано 23.12.2025



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.47.2025.10>

О. В. Савченко, В. В. Ніжник

*Інститут наукових досліджень з цивільного захисту,
м. Київ Україна*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4140-3055> – О. В. Савченко

<https://orcid.org/0000-0003-3370-9027> – В. В. Ніжник

✉ Alesa@ukr.net

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

Мета. У статті наведено результати розв'язання наукової задачі щодо вдосконалення методу оцінювання індивідуального пожежного ризику з урахуванням впливу систем протипожежного захисту. Розкрито методологічний підхід дослідження коефіцієнтів ефективного функціонування систем протипожежного захисту. Показано, що для дослідження коефіцієнтів ефективного функціонування систем протипожежного захисту найбільш придатними можуть стати методи, що ґрунтуються на польових моделях, і методи теорії імовірності в сукупності з використанням статистичних даних.

Результати. У роботі наведені результати теоретичних та експериментальних досліджень із наукового обґрунтування значень коефіцієнтів ефективного функціонування систем протипожежного захисту та їх впливу на індивідуальний пожежний ризик. Представлені результати моделювання громадських об'єктів різного функціонального призначення з використанням польових моделей. Представлені результати розрахунку з використанням методів теорії імовірності за зібраними статистичними даними. Проведено перевірку отриманих результатів розрахунку з результатами експериментального дослідження за попередньо розробленою програмою та методикою експериментальних досліджень.

Наукова новизна роботи полягає у формалізації впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик шляхом введення відповідних коригувальних коефіцієнтів у математичну модель оцінювання. Запропонований підхід дає змогу адаптувати методику до конкретних умов об'єкта, враховуючи не лише наявність, але й фактичну ефективність роботи систем протипожежного захисту. Це відкриває перспективи для подальшого розвитку нормативної бази у сфері пожежної безпеки, а також для впровадження ризик-орієнтованого підходу в практику проектування.

Ключові слова: індивідуальний пожежний ризик, протипожежний захист, оцінювання ризику, системи пожежогасіння, математичне моделювання, ефективність захисту, ризик-орієнтований підхід, пожежна безпека, коефіцієнти ефективного функціонування систем протипожежного захисту.

О. В. Savchenko, V. V. Nizhnyk

Institute of Public Administration and Research in Civil Protection, Kyiv, Ukraine

IMPROVEMENT OF THE METHOD FOR ASSESSING INDIVIDUAL FIRE RISK CONSIDERING THE IMPACT OF FIRE PROTECTION SYSTEMS

Introduction. The article presents the results of solving a scientific problem on improving the method of assessing individual fire risk, taking into account the influence of fire protection systems. A methodological approach to studying the coefficients of effective functioning of fire protection systems is disclosed. It is shown that for studying the coefficients of effective functioning of fire protection systems, methods based on field models and methods of probability theory in combination with the use of statistical data may be the most suitable.

Results. The paper presents the results of theoretical and experimental studies on the scientific substantiation of the values of the coefficients of effective functioning of fire protection systems and their impact on individual

fire risk. The results of modeling public facilities of various functional purposes using field models are presented. The results of calculations using probability theory methods based on collected statistical data are presented. The obtained calculation results were checked with the results of experimental research according to the previously developed program and methodology of experimental research.

The scientific novelty of the work lies in the formalization of the impact of fire protection systems on individual fire risk by introducing the appropriate correction coefficients into the mathematical evaluation model. The proposed approach allows you to adapt the methodology to the specific conditions of the facility, taking into account not only the availability, but also the actual efficiency of fire protection systems. This opens up prospects for further development of the regulatory framework in the field of fire safety, as well as for the implementation of a risk-based approach in design practice.

Key words: individual fire risk; fire protection; risk assessment; fire extinguishing systems; mathematical modeling; protection effectiveness; risk-based approach; fire safety; coefficients of effective functioning of fire protection systems.

Постановка проблеми. Щороку в Україні реєструється близько 90 тис. пожеж. На таких пожежах гине близько 2 тис. людей, у тому числі близько 100 дітей. Щорічно матеріальні втрати від пожеж становлять понад 10 млрд грн. Щодня пожежі знищують або пошкоджують близько 70 будівель і споруд. За останні десять років загинув людей на пожежах у середньому по Україні перевищує показник таких країн, як Велика Британія, Італія, Франція та Польща разом взяті.

Якщо статистичні дані про кількість загиблих унаслідок пожеж порівняти з кількістю населення, то отримаємо значення індивідуального пожежного ризику, яке становить відповідно $3,3 \cdot 10^{-5}$, що перевищує допустиме значення згідно з [1].

Одним із технічних заходів, що може знижувати пожежні ризики, є обладнання об'єктів системами протипожежного захисту (СПЗ). При цьому такі системи впливають на рівень пожежного ризику як індивідуально, так і спільною синергічною дією.

На сьогодні врахування впливу СПЗ під час оцінювання параметрів пожежних ризиків або інших параметрів пожежної небезпеки об'єктів частково враховано в [1; 2], а процеси впливу відповідних СПЗ на величину пожежного ризику досліджені неповною мірою.

Така ситуація призвела до того, що застосування СПЗ з погляду забезпечення пожежної безпеки об'єкта є ефективним рішенням, але під час оцінювання індивідуального пожежного ризику ефективність застосування СПЗ враховується опосередковано та фактично немає можливості врахувати особливості окремого виду системи або випадку одночасного впливу (функціонування) декількох систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основним завданням під час проєктування будь-якої технічної системи є підвищення ефективності та якості, а отже, поліпшення таких характеристик технічної системи, як надійність, міцність, швидкодія тощо. На СПЗ, як і на інші технічні

системи, поширюються вимоги щодо їх ефективності. При цьому ефективність їх функціонування повинна оцінюватися за допомогою детермістичних методів, деякі з них, зокрема, наведено в роботі [3].

Існуючі методи для визначення ефективності проєктованих СПЗ використовують апроксимаційні моделі, побудовані на основі спеціальних розділів теорії імовірностей і математичної статистики. Ці моделі розробляють у припущенні, що процес експлуатації визначається зовнішніми причинами та залежить від так званого внутрішнього стану самої системи. При цьому розглядається умова потенційної можливості відмови в будь-якому компоненті систем, що призводить у підсумку до зниження надійності системи загалом, що зумовлює процес її експлуатації та рівень якості її функціонування [4].

Використання такого підходу до оцінки рівня пожежної безпеки об'єкта дає змогу обґрунтовано (за кількісним критерієм) вибрати раціональну структуру СПЗ об'єкта. При цьому забезпечення пожежної безпеки об'єкта здійснюється шляхом розгляду та послідовної оцінки різних альтернативних варіантів СПЗ та їх комбінацій. Таким чином, враховуються вимоги, що визначають рівень пожежної безпеки об'єкта, показники якості функціонування й економічності даної системи. Створюється можливість розглянути ефективність впливу як окремої СПЗ, так і їх комбінацій з урахуванням синергізму їх спільної дії [4].

У роботі [5] проаналізовано сучасний стан щодо управління індивідуальним пожежним ризиком із використанням СПЗ. Аргументовано потребу в удосконаленні СПЗ та методології з управління індивідуальним пожежним ризиком шляхом виявлення коефіцієнтів ефективності функціонування СПЗ як підґрунтя такого вдосконалення. Проаналізовано методичні підходи до оцінювання СПЗ для об'єктів різного функціонального призначення. Показано недосконалість існуючих методичних підходів до оцінювання індивідуального

пожежного ризику, зокрема в частині врахування ефективності функціонування СПЗ.

У роботах [6; 7] наведені теоретичні й експериментальні методи, які доцільно використовувати під час дослідження впливу СПЗ на пожежні ризики.

У національних стандартах серії 16732 [8–10] визначені підходи, етапи та приклади реалізації розрахункових методів щодо оцінювання пожежного ризику. Зокрема, стандарт [8] встановлює загальні підходи й етапи визначення пожежного ризику, а саме аналіз і усвідомлення ризику, вибір найнесприятливішого ризику, розрахунок ризику, оцінювання розрахункового значення ризику з прийнятним рівнем ризику. У стандартах [9; 10] наведено ілюстрування виконання етапів оцінювання пожежного ризику, що визначені у [8], для офісної будівлі та промислового підприємства відповідно.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Попри наявність значної кількості досліджень, присвячених оцінюванню пожежного ризику, більшість із них базуються на спрощених статистичних або нормативних підходах, що не враховують реального технічного стану та функціональної ефективності СПЗ. У чинних методиках розрахунку індивідуального пожежного ризику вплив СПЗ на величину індивідуального пожежного ризику встановлюється через коефіцієнт імовірності ефективного спрацювання СПЗ. При цьому визначено, що значення такого коефіцієнта отримується за даними технічної документації щодо вірогідності безвідмовної роботи, а в разі відсутності таких даних допускається застосовувати значення ймовірності ефективного спрацювання кожної СПЗ, що дорівнює 0,5 (аналіз технічної документації на існуючі

системи показав відсутність значення такого параметра, а його значення «0,5» прийнято експертним шляхом без належного наукового обґрунтування та не враховує специфіку функціональності кожної окремої системи).

Недостатньо також досліджено вплив комбінації декількох СПЗ на формування ризику. Відсутність єдиної інтегративної моделі, яка б дала можливість кількісно оцінити внесок кожної системи у зниження ризику, обмежує можливість використання ризик-орієнтованого підходу в практиці проєктування. Отже, залишається актуальним завдання розроблення вдосконаленого методу оцінювання індивідуального пожежного ризику, що враховує наявність СПЗ.

Мета роботи. Метою роботи є виявлення закономірності впливу СПЗ на розрахункові параметри індивідуального пожежного ризику як наукового підґрунтя для вдосконалення методу оцінювання індивідуального пожежного ризику.

Виклад основного матеріалу. Під час дослідження впливу СПЗ на значення індивідуального пожежного ризику слід порівняти між собою два можливі варіанти подій, а саме: перший варіант, коли пожежа відбувається і відповідна СПЗ не функціонує, при цьому кількісно оцінюють наслідки від такої пожежі, та другий варіант, коли пожежа відбувається, спрацьовує відповідна СПЗ, при цьому також кількісно оцінюються наслідки від пожежі. Шляхом порівняння кількісних значень наслідків від пожеж за двома варіантами сценаріїв їх розвитку можна отримати коефіцієнт імовірної ефективності спрацювання СПЗ. Структурну схему дослідження коефіцієнтів імовірної ефективності функціонування СПЗ наведено на рисунку 1.

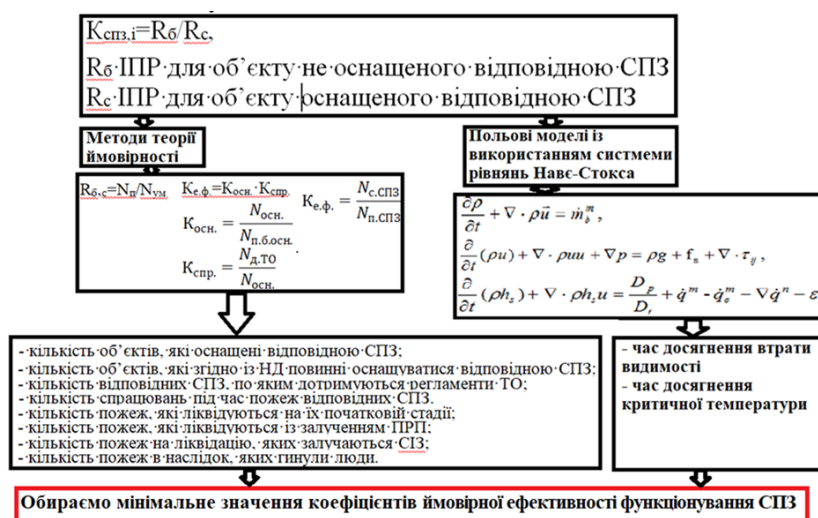


Рис. 1. Структурна схема дослідження коефіцієнтів імовірної ефективності функціонування СПЗ

Реалізуючи підхід щодо визначення коефіцієнта впливу СПЗ на значення індивідуального пожежного ризику з використанням польових моделей, ми провели відповідні розрахунки за такими сценаріями: розвиток пожежі без функціонування СПЗ, розвиток пожежі за функціонування СПЗ. При цьому розрахунки проведені для таких об'єктів, як офісний центр, торговельний центр та лікувальний заклад. Результати розрахунків наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Результати розрахунків із використанням польових моделей

Вид СПЗ	Коефіцієнти ймовірної ефективності СПЗ		
	Офісний центр	Торговельний центр	Лікарня
Димовидалення	0,49	0,45	0,44
Спринклерна система пожежогасіння	0,85	0,84	0,86
Димовидалення та спринклерна система	0,92	0,93	0,95

Один із розрахунків проведений для об'єкта, на якому мала місце пожежа, а саме «Епіцентр» м. Первомайськ, з метою порівняння реальних подій на пожежі (автоматична пожежна сигналізація спрацювала та подала сигнал для евакуації людей, автоматична система пожежогасіння не спрацювала, за 4 хв відбулося заповнення торговельної зали димом, за 2 хв спрацювали клапани системи протидимного захисту, що свідчить про досягнення температури близько 70 °С на рівні покриття) з результатами розрахунку. Слід відмітити, що абсолютні відхилення результатів розрахунку з реальними наслідками пожежі становлять 20 с для часу досягнення втрати видимості та 20 с для часу досягнення температури спрацювання протидимних клапанів у місці їх розташування, що у відносних показниках не перевищує 10 та 20 % відповідно.

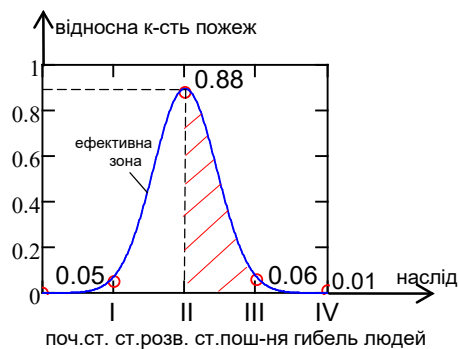
Реалізуючи підхід щодо визначення коефіцієнта впливу систем протипожежного захисту на значення індивідуального пожежного ризику з використанням теорії ймовірності, ми зібрали відповідні статистичні дані. За результатами обробки статистичних даних встановлено відносну кількість пожеж за оснащення об'єкта відповідними системами протипожежного захисту для різних стадій ліквідації пожежі, а саме: пожежу погашено на початковій стадії її розвитку, пожежу погашено

із залученням пожежно-рятувальних підрозділів, пожежу погашено із залученням додаткових сил і засобів, на пожежі мала місце загибель людини.

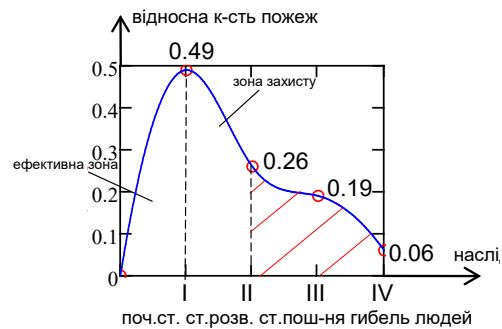
Використовуючи вищезазначені отримані дані, можна побудувати залежності ефективності функціонування відповідної системи протипожежного захисту (рис. 2).

Аналізуючи ці залежності, можна зазначити, що для кожної СПЗ ефективність її функціонування характеризується відповідними стадіями пожежі, на якій вона ліквідована. Наприклад, ефективність функціонування автоматичних систем пожежогасіння характеризується стадією ліквідації пожежі на їх початкових стадіях. Відносна кількість таких випадків становить 0,49. Ефективність функціонування автоматичних систем пожежної сигналізації, систем оповіщення, протидимного захисту, зовнішнього та внутрішнього протипожежного водопостачання характеризується стадією ліквідації пожеж із залученням пожежно-рятувальних підрозділів. Відносна кількість таких випадків становить 0,88; 0,64; 0,75 відповідно. Такі стадії, як пожежа, для ліквідації якої залучаються додаткові сили та засоби, і пожежа, на якій мала місце загибель людини, відносимо до подій із неприйнятним ступенем ризику. Слід відмітити досить високу ефективність впливу функціонування таких систем, як автоматична система пожежогасіння, протидимного захисту, внутрішнього та зовнішнього протипожежного водопостачання, для стадії ліквідації пожежі із залученням додаткових сил і засобів. Це можна пояснити можливістю ефективного використання зазначених систем на різних стадіях розвитку пожежі та різних масштабах її розвитку.

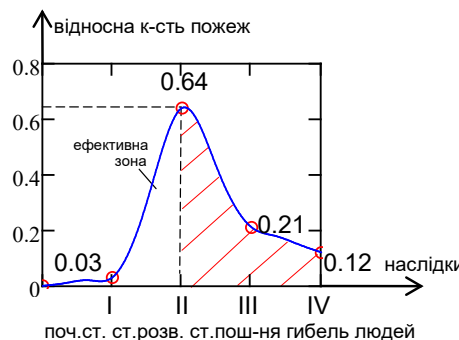
Із значень коефіцієнтів ефективного функціонування СПЗ, що визначені з використанням польових моделей та з використанням теорії ймовірності, вибираємо значення, яке найменше знижує значення індивідуального пожежного ризику, та встановлюємо значення коефіцієнтів ймовірності ефективного функціонування СПЗ. При цьому слід врахувати, що система оповіщення про пожежу не функціонує без автоматичної системи пожежної сигналізації, тому коефіцієнти ймовірності ефективного функціонування таких систем доцільно об'єднати. Системи протидимного захисту, внутрішнього та зовнішнього протипожежного водопостачання реалізують одну з основних функцій щодо забезпечення безпеки пожежно-рятувальних підрозділів під час проведення рятувальних робіт і робіт щодо ліквідації пожежі, тому коефіцієнти ймовірності ефективного функціонування таких систем також доцільно об'єднати.



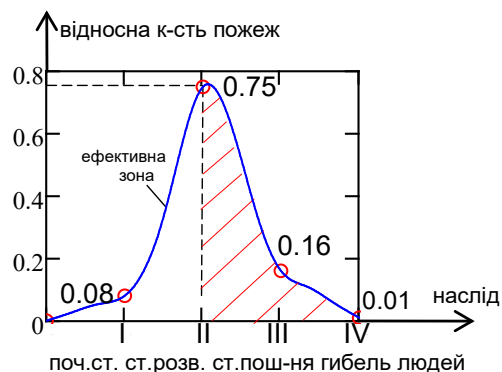
а)



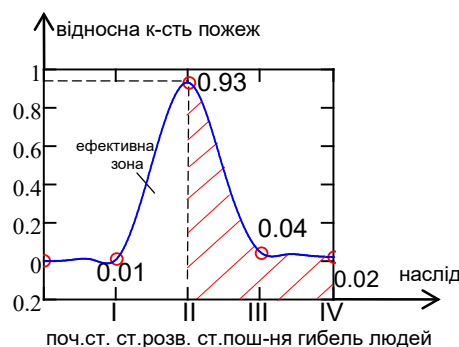
б)



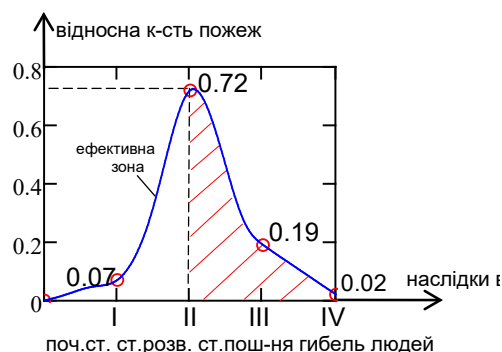
в)



г)



д)



е)

Рис. 2. Залежності ефективності функціонування відповідної системи протипожежного захисту від умов гасіння пожежі: а) для АПС, б) для АСПГ, в) для СПДЗ, г) для СО, д) для ЗВ, е) для ВВ

Таким чином, встановлено, що значення коефіцієнтів імовірності ефективного функціонування систем протипожежного захисту становлять для систем автоматичної пожежної сигналізації та оповіщення про пожежу – 0,61, для системи автоматичного пожежогасіння – 0,87, для систем протидимного захисту, внутрішнього та зовнішнього протипожежного водопроводу – 0,5.

З метою перевірки отриманих результатів проведено експериментальні дослідження згідно

з розробленою програмою та методикою експериментальних досліджень [7].

Експериментальні дослідження проводили за аналогічних умов, що і розрахунки, а саме: приміщення не оснащене СПЗ, приміщення оснащене автоматичною системою пожежної сигналізації, приміщення оснащене системою протипожежного захисту, приміщення оснащене автоматичною системою пожежогасіння, по три рази для кожної з умов.

Результати та їх обговорення. За результатами аналізу усереднених даних експериментальних досліджень встановлено, що значення критичної для життя людини температури досягнуто на 36-й секунді експерименту, а втрата видимості – на 28-й секунді експерименту. Автоматична система пожежної сигналізації спрацювала на 15-й секунді експерименту, що виражає коефіцієнт ефективності функціонування автоматичних систем пожежної сигналізації із значенням 0,58 та 0,52 відповідно, що порівняно з теоретичними даними становить близько 3 та 14 %. У разі функціонування систем протидимного захисту значення критичної для життя людини температури досягнуто на 53-й секунді експерименту, що виражає коефіцієнт ефективного функціонування систем протидимного захисту 0,32, а втрата видимості – на 56-й секунді експерименту, що виражає коефіцієнт ефективного функціонування систем протидимного захисту 0,4, що порівняно з теоретичними даними становить близько 20 %. Автоматична система пожежогасіння спрацювала на 7-й секунді експериментального дослідження та за значенням температури не дала досягнути критичного значення для життя людини небезпечного чинника пожежі, а втрата видимості на 87-й секунді експерименту виражає коефіцієнт ефективного функціонування систем пожежогасіння 0,89, що порівняно з теоретичними даними становить близько 7 %.

Таким чином, теоретичні дані максимально наближені до усереднених даних експерименту, що дає можливість використати ці дані для подальшого вдосконалення методу оцінювання індивідуального пожежного ризику з урахуванням впливу систем протипожежного захисту.

Висновки. 1. Встановлено, що одним із технічних заходів, що може знижувати пожежні ризики, є обладнання об'єктів СПЗ. При цьому такі системи впливають на рівень пожежного ризику як самостійно, так і спільною взаємодією, що можна врахувати відповідними коефіцієнтами. Запропоновано вдосконалення структурної схеми СПЗ шляхом врахування у складі такої схеми рівнів впливу відповідними СПЗ на значення індивідуального пожежного ризику, що надає перспективи для подальшого розвитку методів оцінювання індивідуального пожежного ризику.

2. Обґрунтовано сценарії для дослідження впливу СПЗ на розрахункові параметри індивідуального пожежного ризику, а саме: розвиток пожежі в разі функціонування відповідної СПЗ та розвиток пожежі в разі відсутності СПЗ. Встановлено перелік найбільш значущих параметрів. Зокрема, встановлено, що суттєвим показником надійності

СПЗ є безвідмовність та ефективність їх функціонування. Зазначені показники можна виразити через тривалість настання граничного значення для життя людини найшвидшого небезпечного чинника пожежі – втрати видимості, що досліджують за критерієм «коефіцієнт задимленості».

3. Показано, що оцінювання впливу СПЗ на значення індивідуального пожежного ризику можна здійснити двома шляхами з використанням теорії імовірності на основі статистичних даних та з використанням методу, який заснований на польових комп'ютерних моделях і засобах обчислювальної газогідродинаміки. Запропоновано алгоритм дослідження впливу СПЗ на значення індивідуального пожежного ризику та встановлення відповідних коефіцієнтів впливу. Показано адекватність таких методів: порівняно з результатами експериментальних досліджень відносні відхилення становили близько 14, 20 та 7 % для систем пожежної сигналізації, систем протидимного захисту та систем пожежогасіння відповідно.

4. Встановлено, що значення коефіцієнтів імовірності ефективного функціонування СПЗ становлять для систем автоматичної пожежної сигналізації та оповіщення про пожежу – 0,61, для системи автоматичного пожежогасіння – 0,87, для систем протидимного захисту, внутрішнього та зовнішнього протипожежного водопроводу – 0,5. Значення цих коефіцієнтів впроваджені шляхом внесення зміни № 1 до [1].

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Пожежна безпека. Загальні положення : ДСТУ 8828:2019 [Чинний від 27.02.2019]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 87 с. (Національний стандарт України).
2. Пожежна безпека. Визначення протипожежних відстаней між об'єктами розрахунковими методами. Основні положення : ДСТУ 9058:2020 [Чинний від 01.05.2021]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2021. 5с. (Національний стандарт України).
3. Stephen G. Badger, Thomas Johnson. 1999 Large Loss Fires and Explosions. *NFPA Journal*. November / December 2000. P. 79–82.
4. Фан А. Ле Н. З. Аналіз заходів щодо зниження ризику загоряння у висотних житлових будівлях. Журнал з пожежної безпеки ІРВ Республіки В'єтнам. 2015. Т. 77. С. 20–23.
5. Ніжник В., Савченко О., Добряк Д., Кравченко Н. Аналіз сучасного стану управління індивідуальним пожежним ризиком із використанням систем протипожежного захисту. *Науковий журнал «Вчені записки таврійського національного університету імені В. І. Вернадського»*. Серія: «Технічні науки». Том 33 (72), № 1. Київ, 2022. С. 328–333.
6. Ніжник В. В., Савченко О. В., Некора В. С. Теоретичні підходи для дослідження закономір-

ності впливу систем протипожежного захисту на рівень індивідуального пожежного ризику. *Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗУ «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Том 7, № 1 (2023). С. 67–76.

7. Савченко О. В., Ніжник В. В., Савченко Т. О. Програма та методика експериментальних досліджень впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик. *Науковий журнал «Вчені записки таврійського національного університету імені В. І. Вернадського»*. Серія: «Технічні науки». Том 35 (74), № 1. Київ, 2024. С. 348–353.

8. Інжиніринг пожежної безпеки. Оцінювання пожежного ризику. Частина 1. Загальні положення : ДСТУ ISO 16732-1:2018 (ISO 16732-1:2012, IDT) [Чинний від 01.10.2019]. Вид. офіц. Київ : Технічний комітет з стандартизації «Пожежна безпека та протипожежна техніка», 2019. 21 с.

9. Інжиніринг пожежної безпеки. Оцінювання пожежного ризику. Частина 2. Приклад офісної будівлі : ДСТУ ISO/TR 16732-2:2018 (ISO/TR 16732-2:2012, IDT) [Чинний від 01.10.2019]. Вид. офіц. Київ : Технічний комітет з стандартизації «Пожежна безпека та протипожежна техніка», 2019. 14 с.

10. Інжиніринг пожежної безпеки. Оцінювання пожежного ризику. Частина 3. Приклад промислового підприємства : ДСТУ ISO/TR 16732-3:2018 (ISO/TR 16732-3:2013, IDT) [Чинний від 01.10.2019]. Вид. офіц. Київ : Технічний комітет з стандартизації «Пожежна безпека та протипожежна техніка», 2019. 22 с.

REFERENCES

1. Derzhavne pidpriemstvo “UkrNDNC”. (2019). Pozhezhna bezpeka. Zahalni polozhennia [Fire safety. General provisions]. DSTU 8828:2019 [Effective from 27.02.2019]. Kyiv, Ukraine [in Ukrainian].
2. Derzhavne pidpriemstvo “UkrNDNC”. (2021). Pozhezhna bezpeka. Vyznachennia protypozhezhnykh vidstaney mizh ob'ektyamy rozrakhunkovymy metodamy. Osnovni polozhennia [Fire safety. Determination of fire separation distances between objects by calculation methods. General provisions]. DSTU 9058:2020 [Effective from 01.05.2021]. Kyiv, Ukraine [in Ukrainian].
3. Badger, S. G., & Johnson, T. (1999). Large loss fires and explosions. *NFPA Journal*, November/December, 79–82.
4. Fan, A. L. N. Z. (2015). Analiz meropriyatiy po snizheniyu pozharnoi opasnosti v vysotnykh zhilykh zdaniyakh [Analysis of measures to reduce fire hazard in high-rise residential buildings]. *Zhurnal Pozharnoi Bezpeky IPB Respubliki V'etnam*, 77, 20–23. [in Ukrainian].

5. Nizhnyk, V., Savchenko, O., Dobriak, D., & Kravchenko, N. (2022). Analiz suchasnoho stanu upravlinnia indyvidualnym pozhezhnym ryzykom iz vykorystanniam system protypozhezhnoho zakhystu [Analysis of the current state of individual fire risk management using fire protection systems]. *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V. I. Vernadskoho. Serii: Tekhnichni nauky*, 33 (72) (1), 328–333 [in Ukrainian].

6. Nizhnyk, V. V., Savchenko, O. V., & Nekora, V. S. (2023). Teoretychni pidkhody dlia doslidzhennia zakonmirnosti vplyvu system protypozhezhnoho zakhystu na riven indyvidualnoho pozhezhnoho ryzyku [Theoretical approaches for studying the patterns of fire protection systems' influence on individual fire risk]. *Zbirnyk naukovykh prats Cherkaskoho instytutu pozhezhnoi bezpeky imeni Heroiv Chornobylya NUCZU “Nadzvychnai situatsii: poperedzhennia ta likvidatsii”*, 7 (1), 67–76 [in Ukrainian].

7. Savchenko, O. V., Nizhnyk, V. V., & Savchenko, T. O. (2024). Prohrama ta metodyka eksperymentalnykh doslidzhen vplyvu system protypozhezhnoho zakhystu na indyvidualnyi pozhezhnyi ryzyk [Program and methodology of experimental studies of the influence of fire protection systems on individual fire risk]. *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V. I. Vernadskoho. Serii: Tekhnichni nauky*, 35 (74) (1), 348–353 [in Ukrainian].

8. Tekhnichniy komitet z standartyzatsii “Pozhezhna bezpeka ta protypozhezhna tekhnika”. (2019). Inzhynering pozhezhnoi bezpeky. Otsiniuvannia pozhezhnoho ryzyku. Chastyna 1. Zahalni polozhennia [Fire safety engineering. Fire risk assessment. Part 1. General principles]. DSTU ISO 16732-1:2018 (ISO 16732-1:2012, IDT) [Effective from 01.10.2019]. Kyiv, Ukraine [in Ukrainian].

9. Tekhnichniy komitet z standartyzatsii “Pozhezhna bezpeka ta protypozhezhna tekhnika”. (2019). Inzhynering pozhezhnoi bezpeky. Otsiniuvannia pozhezhnoho ryzyku. Chastyna 2. Pryklad ofisnoi budivli [Fire safety engineering. Fire risk assessment. Part 2. Example of an office building]. DSTU ISO/TR 16732-2:2018 (ISO/TR 16732-2:2012, IDT) [Effective from 01.10.2019]. Kyiv, Ukraine [in Ukrainian].

10. Tekhnichniy komitet z standartyzatsii “Pozhezhna bezpeka ta protypozhezhna tekhnika”. (2019). Inzhynering pozhezhnoi bezpeky. Otsiniuvannia pozhezhnoho ryzyku. Chastyna 3. Pryklad promyslovoho pidpriemstva [Fire safety engineering. Fire risk assessment. Part 3. Example of an industrial enterprise]. DSTU ISO/TR 16732-3:2018 (ISO/TR 16732-3:2013, IDT) [Effective from 01.10.2019]. Kyiv, Ukraine [in Ukrainian].

© О. В. Савченко, В. В. Ніжник

Науково-методична стаття.

Стаття надійшла до редакції 15.09.2025

Стаття прийнята 01.10.2025

Статтю опубліковано 23.12.2025



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.47.2025.11>

N. V. Saienko¹, A. V. Skripinets², A. I. Berezovskyi¹, O. V. Makarenko²

¹ *National University of Civil Protection of Ukraine,
Cherkasy, Ukraine*

² *O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv,
Kharkiv, Ukraine*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4873-5316> – N. V. Saienko

<https://orcid.org/0000-0002-2340-023X> – A. V. Skripinets

<https://orcid.org/0000-0002-4043-1206> – A. I. Berezovskyi

<https://orcid.org/0000-0002-4125-2365> – O. V. Makarenko



saienko_natalia@nuczu.edu.ua

STUDY OF THE COMPOSITION AND TOXICOLOGICAL PROPERTIES OF COMBUSTION PRODUCTS OF EPOXY AND EPOXY-URETHANE FLAME-RETARDANT MATERIALS

Introduction. Ensuring fire safety of polymeric materials remains a critical scientific and practical issue, as their combustion produces a complex mixture of toxic gases hazardous to humans and the environment. Epoxy and epoxy-urethane flame-retardant compositions are widely used in construction, transportation, energy, and aerospace applications due to their high adhesion and protective properties. However, their thermal degradation releases toxic substances such as CO, CO₂, HCN, NO_x, phenol, and formaldehyde, which significantly contribute to fire-related fatalities.

Purpose. The aim of this study was to perform a comparative analysis of the composition and toxicity of combustion and thermo-oxidative degradation products of epoxy and epoxy-urethane flame-retardant composites modified with different flame retardants.

Methods. Experimental investigations were conducted under two thermal regimes simulating real fire conditions: thermo-oxidative degradation (450 °C) and flaming combustion (750 °C). The volatile products were analyzed according to sanitary-chemical indicators, and toxicity was evaluated by determining the HCL₅₀ index and the carboxyhemoglobin (HbCO) level in the blood of laboratory animals after exposure.

Results. It was found that the qualitative composition of combustion products for epoxy and epoxy-urethane systems is similar, though quantitative differences are significant. The main gaseous components were CO and CO₂, while smaller quantities of highly toxic substances (HCN, NO_x, phenol, formaldehyde) were identified. The introduction of ammonium phosphates (mono- and polyphosphate) effectively reduced the concentration of extremely hazardous compounds, particularly HCN and phenol. According to HCL₅₀ values, all compositions were classified as moderately hazardous. The HbCO levels (58.4–65.6%) confirmed that carbon oxides are the dominant toxic agents.

Conclusions. The study demonstrates that phosphorus-containing flame retardants significantly improve the fire safety and environmental performance of polymeric coatings by reducing the toxicity of combustion products. The obtained results provide a scientific basis for developing new generations of low-toxicity intumescent materials.

Key words: fire safety, fire retardant composition, epoxy composites, epoxy-urethane, toxicity, flame retardants, thermo-oxidative degradation.

ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДУ ТА ТОКСИКОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПРОДУКТІВ ГОРІННЯ ЕПОКСИДНИХ І ЕПОКСИУРЕТАНОВИХ ВОГНЕЗАХИСНИХ МАТЕРІАЛІВ

Вступ. Забезпечення пожежної безпеки полімерних матеріалів залишається важливою науковою та практичною проблемою, оскільки під час їх горіння утворюється складна суміш токсичних газів, небезпечних для людини та навколишнього середовища. Епоксидні й епоксиретанові вогнезахисні композиції широко застосовуються в будівництві, транспорті, енергетиці та авіакосмічній техніці завдяки їхнім високим адгезійним і захисним властивостям. Однак термічний розклад таких матеріалів супроводжується виділенням токсичних сполук, зокрема CO, CO₂, HCN, NO_x, фенолу та формальдегіду, які суттєво впливають на рівень смертності під час пожеж.

Мета. Метою дослідження було проведення порівняльного аналізу складу та токсичності продуктів горіння й термоокиснювальної деструкції епоксидних та епоксиретанових вогнезахисних композицій, модифікованих різними антипіренами.

Методи. Експериментальні дослідження виконували у двох термічних режимах, що моделюють умови пожежі: термоокиснювальна деструкція (450 °C) і полуменеве горіння (750 °C). Аналіз летких продуктів здійснювали за санітарно-хімічними показниками, а токсичність оцінювали за показником HCL₅₀ і вмістом карбоксигемоглобіну (HbCO) у крові лабораторних тварин після експозиції.

Результати. Встановлено, що якісний склад продуктів горіння епоксидних і епоксиретанових систем є подібним, проте кількісні співвідношення істотно відрізняються. Основними газоподібними компонентами є CO і CO₂, а також у менших кількостях присутні високотоксичні сполуки (HCN, NO_x, фенол, формальдегід). Введення фосфорвмісних антипіренів (моно- та поліфосфату амонію) сприяє зменшенню концентрацій найбільш небезпечних сполук, особливо HCN та фенолу. За показником HCL₅₀ усі композиції належать до класу помірно небезпечних. Рівень HbCO (58,4–65,6 %) підтверджує провідну роль оксидів вуглецю у формуванні токсичного ефекту.

Висновки. Доведено, що фосфорвмісні антипірени істотно підвищують пожежну безпеку й екологічну ефективність полімерних покриттів, знижуючи токсичність продуктів горіння. Отримані результати можуть бути використані для створення нових поколінь інтумесцентних матеріалів із низьким рівнем токсичності.

Ключові слова: пожежна безпека, вогнезахисна композиція, епоксидні композиції, епоксиретанові матеріали, токсичність, антипірени, термоокиснювальна деструкція.

Introduction. Polymeric flame-retardant compositions based on epoxy and epoxy-urethane resins are widely used in construction, transportation, energy, and aerospace industries due to their excellent adhesion, mechanical, and protective properties [1–4]. However, under exposure to high temperatures or open flame, these materials undergo thermal decomposition accompanied by the release of combustion products that may be toxic to humans and the environment. The analysis of the composition and toxicity of such products is essential for assessing the safety of flame-retardant coatings [5–9].

According to national and international statistics, about 85% of fatalities during building fires are caused not by the direct impact of flames or elevated temperatures, but by the toxic effects of combustion products. The most hazardous among them are carbon oxides, nitrogen oxides, hydrogen chloride, and hydrogen cyanide, which can be lethal even at relatively low concentrations [10–13].

Polymer combustion is a complex physicochemical process that involves:

- degradation of macromolecules with the formation of low-molecular-weight volatile compounds;
- crosslinking and carbonization in the condensed phase;
- oxidative reactions in the gas phase leading to the generation of toxic gases;
- intensive heat and mass transfer processes that accelerate fire propagation.

In this context, investigation of the composition and toxicity of combustion products of epoxy and epoxy-urethane polymeric flame-retardant systems is highly relevant, as these materials are increasingly used in various industries.

Analysis of recent research and publications. Epoxy polymers are obtained by polymerization of epoxy resins with curing agents (amines, anhydrides, acids). Their structure is predominantly composed of carbon, hydrogen, and oxygen atoms, with possible

incorporation of chlorine, nitrogen, or phosphorus depending on the flame retardants introduced. They are characterized by excellent adhesion and mechanical strength; however, during combustion they release volatile organic compounds capable of undergoing secondary oxidation in the smoke phase [14; 15].

Epoxy-urethane polymers contain urethane groups formed by the reaction of isocyanates with hydroxyl-containing components. Their structure exhibits greater thermal stability, yet their combustion produces a broader and more toxic spectrum of gases, with isocyanates and hydrogen cyanide being particularly hazardous [16].

During the thermal degradation and combustion of epoxy materials, the formation of the following compounds is observed [17; 18]:

- carbon monoxide (CO) – a highly toxic gas that binds to hemoglobin and causes hypoxia;
- carbon dioxide (CO₂) – non-toxic, but at high concentrations displaces oxygen;
- aldehydes (formaldehyde, acetaldehyde) – carcinogenic substances that irritate the respiratory tract;
- phenolic compounds, bisphenol-A – exhibiting mutagenic and cumulative toxic effects;
- hydrogen chloride (HCl) and phosphoric acids – in the presence of halogen- or phosphorus-containing flame retardants, forming acidic aerosols hazardous to the lungs.

In contrast to epoxy systems, epoxy-urethane compositions additionally release a range of highly toxic nitrogen-containing compounds [19–21]:

- hydrogen cyanide (HCN) – one of the most hazardous products, inhibits cellular respiration, and is lethal at very low concentrations;
- isocyanates (MDI, TDI, and their derivatives) – cause acute bronchospasm, pulmonary edema, and allergic reactions;
- ammonia (NH₃) – irritates mucous membranes and, at high concentrations, is neurotoxic;
- nitro compounds – exhibiting carcinogenic and mutagenic activity.

Epoxy-urethane coatings can also form a carbonaceous residue, which to some extent slows flame propagation; however, the toxicological risk from their combustion products significantly exceeds that of epoxy systems.

It has been demonstrated that during heating and combustion, epoxy and polyurethane binders undergo complex chemical reactions, producing vapor- and gas-phase toxic products. Among the most hazardous are:

- epichlorohydrin – irritates mucous membranes and has carcinogenic potential;
- phenol – neurotoxic and exhibits cumulative effects;

- formaldehyde – a strong carcinogen and mutagen;
- hydrogen cyanide (HCN) – a highly potent fast-acting poison that inhibits tissue respiration;
- isocyanates – compounds causing acute respiratory disorders, pulmonary edema, and sensitization effects.

As a result, the toxicological properties of gaseous combustion products are determined by the complex interactions among the individual components of the smoke. In some cases, synergistic effects enhance toxicity, while in others, partial neutralization of certain harmful substances may occur.

Epoxy and polyurethane systems are known for their virtually unlimited possibilities for physico-chemical modification. Thanks to a wide range of reagents and additives-such as curing agents, plasticizers, fillers, stabilizers, flame retardants, and other functional additives-the structure and properties of polymeric materials can be purposefully tailored [22–28]. With appropriate formulation and strict control of synthesis or coating processing parameters, it is possible to adjust the mechanical, thermal, adhesive, electrical insulation, and flame-retardant properties of the final material. However, despite their high versatility and processability, these systems still belong to the category of combustible polymeric materials. This underlines the growing interest in studying their behavior during thermo-oxidative degradation.

Previously unresolved parts of the overall problem. An analysis of recent scientific literature indicates that, despite a substantial body of research aimed at improving the flame-retardant properties of polymeric materials through their modification with flame retardants, information regarding the composition and toxicity of their thermo-oxidative degradation products remains extremely limited. In most cases, attention has been focused on fire resistance characteristics and thermal insulation efficiency, whereas issues of toxicological safety remain insufficiently studied.

Therefore, further research in this area is both relevant and necessary. The results of such studies will not only allow an objective assessment of risks to human health and the environment but also facilitate the development of new generations of environmentally safe flame-retardant polymeric materials that combine high performance with minimal toxicity of combustion products.

The aim of this work was to conduct a comparative study of the formation and toxicity of volatile compounds during the combustion and thermo-oxidative degradation of flame-retardant compositions based on epoxy and epoxy-urethane polymers.

Research materials. The objects of this study were flame-retardant polymeric compositions of different chemical compositions, namely:

- epoxy-urethane composition (EU), consisting of a mixture of oligoether tricyclocarbonate (80 wt.%) and epoxidized oligomer (20 wt.%), with ammonium polyphosphate (APP) introduced as the main flame retardant. Crosslinking was achieved using diethylenetriamine (DETA). This composition belongs to systems capable of forming a protective, heat-insulating char layer under high-temperature exposure;

- epoxy compositions (EP) cured with a binary system consisting of monoethanolamine diethylenetriamine (UP-633M) and AF-2 (a mixture of 2-dimethylaminomethylphenol and 2,6-bis(dimethylaminomethyl)phenol). Various types of flame retardants were incorporated into the epoxy materials;

- monoammonium phosphate (MAP) – composition designated as EP:MAP;

- co-intercalated graphite (SP), modified with a mixture of sulfuric and phosphoric acids – composition designated as EP:SP.

Thus, the study included both epoxy-urethane systems with ammonium polyphosphate and epoxy compositions with different types of flame retardants (phosphate- and graphite-based), allowing for a comparative evaluation in terms of the composition and toxicity of their combustion products.

Research methods. The determination of the integral toxicity index of combustion products of polymeric materials was carried out in accordance with the M. G. 8.8.2.4-127-2006. Methodological guidelines “Determination and Hygienic Assessment of Toxicity Indicators of Combustion Products of Polymeric Materials”. Experiments were performed under two thermal regimes simulating characteristic fire conditions (Table 1):

- thermo-oxidative degradation at 450 °C (simulating smoldering and high-temperature heating without flame);

- flaming combustion at 750 °C (simulating the intensive phase of a fire).

This approach provides a comprehensive understanding of the chemical composition and toxicity of volatile products formed under different thermal exposure scenarios for the tested materials.

Results and Discussion. The obtained data on the migration of chemical substances during the simulation of combustion conditions for the tested flame-retardant compositions are presented in Table 2. The results allow tracking the differences in the composition and concentrations of volatile products for different types of polymer systems, which, in turn, provides an important basis for further analysis and discussion of the toxicological characteristics of these materials.

The table presents the results of the quantitative determination of the main combustion products (mg/g) for epoxy (EP) and epoxy-urethane (EU) flame-retardant compositions, modified with different flame retardants, under thermo-oxidative degradation (450 °C) and flaming combustion (750 °C).

The obtained results indicate that:

- nitrogen oxide (hazard class III) is formed in significant amounts at both temperatures. At 750 °C, its content in epoxy compositions reaches 17.9–18.4 mg/g, whereas for EU:EP:APP, this value decreases to 2.4 mg/g;

- ammonia (hazard class IV) is predominantly formed at 450 °C (4.5–9.2 mg/g); however, its concentration decreases by more than half at elevated temperatures;

- benzene (hazard class II) is detected at 450 °C (up to 2.6 mg/g), but its amount drops nearly to trace levels (0.5–0.9 mg/g) at 750 °C;

- halogen-containing compounds (hydrogen chloride, carbon tetrachloride) were recorded only in individual samples and in minor amounts (0.12–0.9 mg/g);

- hydrogen cyanide (hazard class II) is detected in all cases; the highest values are typical for epoxy compositions at 750 °C (7.8 mg/g), whereas for EU:EP:APP, the content is significantly lower (0.2 mg/g);

- carbon dioxide is the main product, with its amount increasing substantially at 750 °C, ranging from 510 to 630 mg/g;

Table 1

Testing conditions for polymer compositions

Testing mode	Process characteristics	Fire simulation conditions	Expected decomposition products
Thermo-oxidative decomposition (450 °C)	Slow smoldering, decomposition without flame	Localized heating of materials, initial-stage smoke	Volatile organic compounds, aldehydes, phenols, isocyanates, carbon and nitrogen oxides
Flame combustion (750 °C)	Intensive oxidation with heat release and flame	Advanced fire stage with active flame spread	Toxic gases (CO, CO ₂ , HCN, NO _x), polymer decomposition products, volatile acids, and soot

– carbon monoxide (hazard class IV) is formed in large quantities (70–150 mg/g), making it one of the principal toxic agents;

– phenol, formaldehyde, and chlorobenzene (hazard classes II–III) are present at lower concentrations (0.5–8 mg/g); however, their toxicological significance should not be ignored.

The total mass loss ranged from 74 to 96%, indicating different degrees of decomposition of the compositions depending on their chemical formulation.

The qualitative composition of combustion products of epoxy and epoxy-urethane polymeric compositions is generally similar, differing mainly in the quantitative concentrations of gaseous components. It was found that the total content of volatile products under flaming combustion conditions (750 °C) is generally lower for all tested samples than under thermo-oxidative degradation conditions (450 °C). The main components of the gas phase remain carbon dioxide and carbon monoxide.

Incorporation of co-intercalated graphite into the epoxy composition leads to an increase in CO₂ and CO yields, while simultaneously reducing mass loss during decomposition and combustion by 10–12% compared to the original epoxy polymer. The qualitative spectrum of volatile products remains practically unchanged, and the concentrations of the most toxic compounds (hydrogen cyanide, nitrogen oxides, benzene, phenol, formaldehyde) remain at the level of the original composition. The significant content of hydrogen cyanide in the decomposition products of epoxy polymers (EP and EP:SP) is likely due to the presence of cyano groups in the structure of the amine hardener UP-633M. The formation of

phenol and benzene is explained by the presence of aromatic fragments in both the epoxy oligomer structure and the AF-2 hardener.

The use of the monoammonium phosphate (MAP) flame-retardant additive significantly affects the toxicological characteristics of the combustion products of epoxy compositions (EP:MAP). In particular, there is a pronounced reduction in the concentrations of extremely hazardous (HCN) and highly hazardous (benzene, phenol, formaldehyde) substances, which is consistent with the known inhibitory mechanisms of MAP.

A comparative analysis of the epoxy-urethane composition (EU:EP:APP) and the epoxy polymer with MAP revealed differences related to the chemical nature of the polymer matrix and the hardener. The epoxy-urethane system contains fewer aromatic fragments, which directly influences the nature of the decomposition products. Under a similar mode of action of APP and MAP, the following features are observed:

– during thermo-oxidative degradation, hydrogen cyanide content decreases 7-fold (from 6.6 to 0.9 mg/g), and under flaming combustion, it decreases more than 18-fold (from 6.6 to 0.2 mg/g);

– nitrogen oxide concentrations decrease 4.7-fold (from 9.0 to 1.9 mg/g), and ammonia decreases 1.6-fold (from 4.5 to 2.8 mg/g);

– formaldehyde content decreases 14–20-fold;

– at the same time, an increase in carbon monoxide yield (1.4-fold, from 92 to 130 mg/g) and benzene (1.8-fold, from 14 to 26 mg/g) was noted.

In addition, traces of chlorine-containing compounds (HCl, CCl₄, chlorobenzene) were detected in the decomposition products of the epoxy-urethane

Table 2

Migration of substances under simulated combustion conditions of fire-retardant compositions

Component (hazard class)	Combustion product content, mg/g							
	at 450 °C				at 750 °C			
	EP	EP: SP	EP: MAP	EU: EP:APP	EP	EP: SP	EP: MAP	EU: EP:APP
Nitrogen oxide (III)	15.1	15.1	9.0	1.9	18.4	17.9	11.2	2.4
Ammonia (IV)	9.2	8.7	4.5	2.8	4.3	4.1	2.3	1.1
Benzene (II)	1.8	1.9	1.4	2.6	0.6	0.6	0.5	0.9
Hydrogen chloride (II)	not detected			0.9	not detected			0.3
Carbon tetrachloride (II)	not detected			0.12	not detected			
Hydrogen cyanide (I)	13.2	12.4	6.6	0.9	6.2	7.8	3.7	0.2
Carbon dioxide (IV)	364	412	397	367	510	630	458	493
Carbon monoxide (IV)	116	150	92	130	88	98	70	87
Phenol (II)	8.9	7.3	1.6	–	2.4	2.1	0.5	–
Formaldehyde (II)	4.2	3.8	2.2	1.6	2.9	3.1	1.8	0.8
Chlorobenzene (III)	not detected			0,16	not detected			
Mass loss, %	88	74	81	80	95	85	93	96

compositions, likely due to residual chlorine in the oligoether tricyclocarbonate.

Summarizing the results of the sanitary-chemical analysis, it can be stated that under thermo-oxidative conditions, epoxy-urethane flame-retardant compositions, compared to epoxy systems, exhibit a significant reduction in the formation of extremely hazardous (HCN) and highly hazardous (NO_x , phenol) substances, while the yield of carbon monoxide increases.

The aim of the toxicological studies was to determine the HCL_{50} toxicity index, defined as the ratio of the material mass to the unit volume of a closed chamber, the combustion products of which cause the death of 50% of test animals. The exposure duration was 30 ± 0.5 minutes [12].

Another important parameter is the HbCO index, which reflects the level of carboxyhemoglobin in the blood of animals that died immediately after exposure in the combustion chamber. This parameter is used to determine the predominant biochemical mechanisms of toxic action of combustion products [29–31]. It is generally accepted that the toxic effect is primarily due to carbon monoxide when HbCO levels in the blood reach 50% or higher. At the same time, previous studies [30] indicate that at HbCO values below 60%, the lethal effect may result from the combined action of both major (carbon monoxide and carbon dioxide) and minor toxic components, which are characteristic, in particular, of polyurethane foams.

According to the data in Table 2, the minimum HCL_{50} values for all tested polymer samples were observed under smoldering conditions at 450°C , ranging from 52.6 to 82.5 g/m^3 . According to the classification of DSTU 8829:2019, all tested materials are categorized as moderately hazardous.

Among the studied compositions, the lowest toxicity was observed for the sample based on the epoxy dian oligomer with the addition of monoammonium phosphate (MAP), despite the higher hydrogen cyanide content in its combustion products compared to the epoxy-urethane polymer.

Furthermore, the results in Table 3 indicate that after exposing animals to gaseous mixtures generated by the combustion of epoxy and epoxy-urethane samples at concentrations causing 50% mortality, the HbCO levels in the blood of the deceased animals ranged from 58.4 to 65.6%. This suggests that, regardless of the chemical nature of the polymers and the presence of flame-retardant additives, the primary mechanism of toxic action of combustion products is due to carbon oxides.

Conclusions. The conducted study demonstrated that the qualitative composition of volatile combustion products of epoxy and epoxy-urethane flame-retardant compositions is generally similar and differs mainly in quantitative characteristics. The main components of the gas phase in both cases are carbon dioxide and carbon monoxide.

It was established that under thermo-oxidative degradation conditions (450°C), a significantly higher amount of toxic substances is formed compared to flaming combustion (750°C). This highlights the hazard of the initial phases of a fire, when materials smolder without visible flames.

The addition of flame retardants (monoammonium phosphate or co-intercalated graphite) to the epoxy compositions affects the amount of decomposition products. The most pronounced reduction in the concentrations of highly hazardous compounds (HCN, phenol, formaldehyde, benzene) is observed when monoammonium phosphate is used, confirming its effectiveness as a flame inhibitor.

For epoxy-urethane compositions containing ammonium polyphosphate, a significant decrease in the content of hydrogen cyanide (by 7–18 times depending on the regime), nitrogen oxides, and formaldehyde was recorded; however, the amounts of CO and benzene increased. Additionally, small concentrations of chlorine-containing compounds were detected, likely due to residual chlorine in the starting oligomers.

Toxicological tests showed that all studied materials belong to the moderately hazardous class according to DSTU 8829:2019. The lowest toxicity

Table 3

Toxicity indicators of combustion products of the studied epoxy and epoxy-urethane polymers

Compositions	Toxicity indicators of combustion products			
	at 450°C		at 750°C	
	$\text{HCL}_{50}, \text{g/m}^3$	HbCO, %	$\text{HCL}_{50}, \text{g/m}^3$	HbCO, %
EP	65.5 ± 6.3	58.4 ± 2.6	86.1 ± 9.9	61.6 ± 3.1
EP: SP	52.6 ± 5.8	60.4 ± 3.1	78.1 ± 7.9	64.8 ± 3.3
EP:MAP	82.5 ± 8.4	65.6 ± 3.2	108.6 ± 10.9	66.8 ± 3.4
EU:EP:APP	55.6 ± 7.6	59.2 ± 2.9	88.5 ± 10.3	62.8 ± 3.1

(HCL₅₀) was observed for the epoxy sample with monoammonium phosphate.

The determination of HbCO levels in the blood of the deceased test animals (58.4–65.6%) confirmed that the primary mechanism of toxic action of the combustion products is the effect of carbon oxides, regardless of the polymer composition and type of flame retardant.

The obtained results have significant practical implications for the development of intumescent flame-retardant materials. They allow not only improving fire protection efficiency but also reducing toxicological risks for humans in the event of a fire.

BIBLIOGRAPHY

1. Hryhorenko O., Zolkina Y., Saienko N., Popov Y., Bikov R. Investigation of adhesive-strength characteristics of fire-retardant epoxy polymers modified with metal-containing additives. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 907 (1). 012060. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/907/1/012060>.
2. Skripinets A., Saienko N., Hryhorenko O., Berezovskiy A. Development and evaluation of the possibility of using epoxyurethane mastic in railway transport. *In Materials Science Forum*. 2020. Vol. 1006. P. 273–281. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1006.273>.
3. Kim Y., Lee S., Yoon H. Fire-safe polymer composites: flame-retardant effect of nanofillers. *Polymers*. 2021. Vol. 13 (4). 540. <https://doi.org/10.3390/polym13040540>.
4. Skripinets A., Saienko N., Blazhko V., Saienko L. Efficiency evaluation: epoxyurethane damping inserts in vibration protection systems. *Municipal economy of cities. Series: "Information Technology and Engineering"*. 2023. Vol. 4 (178). P. 17–26. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-4-178-17-26>.
5. Özmen F. K., Üreyen M. E., Koparal A. S. Cleaner production of flame-retardant-glass reinforced epoxy resin composite for aviation and reducing smoke toxicity. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 276. 124065. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124065>.
6. Yang Z., Xiao G., Chen C., Zhong F., Wang M., Cao, M. Layer-by-layer assembly of nanomultilayer structures: reinforcement of expanded char reduced the toxicity and fire hazard of epoxy resins. *Progress in Organic Coatings*. 2023. Vol. 177. 107426. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107426>.
7. Ogabi R., Manescau B., Chetehouna K., Gascoin N. A study of thermal degradation and fire behaviour of polymer composites and their gaseous emission assessment. *Energies*. 2021. Vol. 14 (21). 7070. <https://doi.org/10.3390/en14217070>.
8. Borucka M., Mizera K., Przybysz J., Kozikowski P., Gajek A. Analysis of flammability and smoke emission of plastic materials used in construction and transport. *Materials*. 2023. Vol. 16 (6). 2444. <https://doi.org/10.3390/ma16062444>.
9. Han S., Yang F., Li Q., Sui G., Su X., Dai J., Ma J. Tackling smoke toxicity and fire hazards of thermoplastic polyurethane by mechanochemical combination of Cu₂O nanoparticles and zirconium phosphate nanosheets. *Polymer Degradation and Stability*. 2023. Vol. 212. 110350. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2023.110350>.
10. Kodur V., Kumar P., Rafi M. Fire hazard in buildings: review, assessment and strategies for improving fire safety. *PSU research review*. 2020. Vol. 4 (1). P. 1–23. <https://doi.org/10.1108/PRR-12-2018-0033>.
11. Wi S., Yang S., Kim Y. U., Kang Y., Kim S. (2022). Toxicity characteristics and fire retardant performance of commercially manufactured organic insulation materials for building applications. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 341. 127898. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127898>.
12. Gałaj J. A., Saleta D. Toxicity of toxic gases emitted during a fire and ventilation. *In Advances in the Toxicity of Construction and Building Materials*. 2022. P. 81–115. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824533-0.00014-1>.
13. Lyu C., Liu C. M., Yu Z. H., Yao H., Sun Y., Xu Y. Y. Thermal decomposition, fire reaction properties and smoke characteristics of carbon/epoxy sandwich laminate. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2025. P. 1–9. <https://doi.org/10.1007/s10973-025-14585-y>.
14. Rudawska A., Sarna-Boś K., Rudawska A., Olewnik-Kruszkowska E., Frigione M. (2022). Biological effects and toxicity of compounds based on cured epoxy resins. *Polymers*. Vol. 14 (22). 4915. <https://doi.org/10.3390/polym14224915>.
15. Gurina G., Skripinets A., Druzhinin E., Saienko N. Epoxy Coating Materials for Transport Protection. *In International Conference on Smart Technologies in Urban Engineering*. 2024. P. 301–309. https://doi.org/10.1007/978-3-032-06832-3_25.
16. Głowacki A., Rybiński P., Czerwionka G., Żukowski W., Mirkhodjaev U. Z., Żelezik M. Flammability, toxicity, and microbiological properties of polyurethane flexible foams. *Materials*. 2024. Vol. 17 (14). 3517. <https://doi.org/10.3390/ma17143517>.
17. Chulikavit N., Huynh T., Khatibi A., Das R., Kandare E. Thermal degradation and flame spread characteristics of epoxy polymer composites incorporating mycelium. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13 (1). 17812. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45097-0>.
18. Ahamad T., Alshehri S. M. Thermal degradation and evolved gas analysis of epoxy (DGEBA)/novolac resin blends (ENB) during pyrolysis and combustion. *Journal of thermal analysis*

and calorimetry. 2013. Vol. 111 (1). P. 445–451. <https://doi.org/10.1007/s10973-012-2431-2>.

19. Liu C., Zong R., Chen H., Wang J., Wu C. Comparative study of toxicity for thermoplastic polyurethane and its flame-retardant composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2019. Vol. 32 (10). P. 1393–1407. <https://doi.org/10.1177/0892705718798409>.

20. Adetunji C. O., Olaniyan O. T., Anani O. A., Inobeme A., Mathew J. T. Environmental impact of polyurethane chemistry. *Polyurethane Chemistry: Renewable Polyols and Isocyanates*. 2021. P. 393–411. <https://doi.org/10.1021/bk-2021-1380.ch014>.

21. Chaudhary M. L., Gupta R. K. Environmental and Health Concerns in Polyurethane. In *Non-Isocyanate Polyurethanes: Chemistry, Progress, and Challenges*. 2025. P. 15–30. <https://doi.org/10.1021/bk-2025-1507.ch002>.

22. Shen C., Shao R., Wang W., Wu X., Zhou B., Zhao L., Xu Z. Progress of flame retardant research on flexible polyurethane foam. *European polymer journal*. 2024. Vol. 220. 113478. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2024.113478>.

23. Hu J., Pan Y. T., Zhou K., Song P., Yang R. A new way to improve the fire safety of polyurethane composites with the assistance of metal–organic frameworks. *RSC Applied Polymers*. 2024. Vol. 2 (6). P. 996–1012. <https://doi.org/10.1039/D4LP00257A>.

24. Gupta R., Singh M. K., Rangappa S. M., Siengchin S., Dhakal H. N., Zafa S. Recent progress in additive inorganic flame retardants polymer composites: Degradation mechanisms, modeling and applications. *Heliyon*. 2024. Vol. 10 (21).

25. Chowaniec A., Czarnecki S., Sadowski Ł. Decreasing the hazardous effect of waste quartz powder and the toxicity of epoxy resin by its synergistic application in industrial coatings. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. Vol. 30 (10). P. 25367–25381. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19772-0>.

26. Liu C., Tao J., Wu T., Zhao H. B., Yu C., Rao W. Construction of hierarchical SiO₂ microcapsule towards flame retardation, low toxicity and mechanical enhancement of epoxy resins. *Chemosphere*. 2023. Vol. 342. 140184. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140184>.

27. Ou M., Cui J., Zhao Z., Li R., Guan H., Liu L., Chen X. Solvent-free intumescent fire protection epoxy coatings with excellent smoke suppression, toxicity reduction, and durability enabled by a micro/nano-structured P/N/Si-containing flame retardant. *Progress in Organic Coatings*. 2023. Vol. 183. 107762. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107762>.

28. Skripinets A., Saienko N., Blazhko V., Saienko L. Efficiency evaluation: epoxyurethane damping inserts in vibration protection systems. *Municipal economy of cities. Series: «Information Technology and Engineering»*. 2023. Vol. 4 (178). P. 17–26.

29. Roderique J. D., Josef C. S., Feldman M. J., Spiess B. D. A. (2015). Modern literature review of carbon monoxide poisoning theories, therapies, and potential targets for therapy advancement. *Toxicology*. 2015. Vol. 334. P. 45–58. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2015.05.004>.

30. Tabian D., Bulgaru Iliescu D., Iov T., Barna B., Toma S. I., Drochioiu G. Hydrogen cyanide and carboxyhemoglobin assessment in an open space fire-related fatality. *Journal of forensic sciences*. 2021. Vol. 66 (3). P. 1171–1175. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.14649>.

31. Tretiakova E. V. (2006) Problem of the hypoxia in the burning toxicology. *Actual problems of transport medicine*. 2006. Vol. 4 (6). P. 78–85.

REFERENCES

1. Hryhorenko, O., Zolkina, Y., Saienko, N., Popov, Y., & Bikov, R. (2020). Investigation of adhesive-strength characteristics of fire-retardant epoxy polymers modified with metal-containing additives. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 907 (1), 012060. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/907/1/012060>.

2. Skripinets, A., Saienko, N. V., Hryhorenko, O., & Berezovskiy, A. (2020). Development and evaluation of the possibility of using epoxyurethane mastic in railway transport. In *Materials Science Forum*. 1006, 273–281. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1006.273>.

3. Kim, Y., Lee, S., & Yoon, H. (2021). Fire-safe polymer composites: flame-retardant effect of nanofillers. *Polymers*, 13 (4), 540. <https://doi.org/10.3390/polym13040540>.

4. Skripinets, A., Saienko, N., Blazhko, V., & Saienko, L. (2023). Efficiency evaluation: epoxyurethane damping inserts in vibration protection systems. *Municipal economy of cities. Series: «Information Technology and Engineering»*, 4 (178), 17–26. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-4-178-17-26>.

5. Özmen, F. K., Üreyen, M. E., & Koparal, A. S. (2020). Cleaner production of flame-retardant-glass reinforced epoxy resin composite for aviation and reducing smoke toxicity. *Journal of Cleaner Production*, 276, 124065. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124065>.

6. Yang, Z., Xiao, G., Chen, C., Chen, C., Zhong, F., Wang, M., & Cao, M. (2023). Layer-by-layer assembly of nanomultilayer structures: reinforcement of expanded char reduced the toxicity and fire hazard of epoxy resins. *Progress in Organic Coatings*, 177, 107426. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107426>.

7. Ogabi, R., Manescau, B., Chetehouna, K., & Gascoin, N. (2021). A study of thermal degradation and fire behaviour of polymer composites and their gaseous emission assessment. *Energies*, 14 (21), 7070. <https://doi.org/10.3390/en14217070>.

8. Borucka, M., Mizera, K., Przybysz, J., Kozikowski, P., & Gajek, A. (2023). Analysis of flammability and smoke emission of plastic materials used in construction and transport. *Materials*, 16 (6), 2444. <https://doi.org/10.3390/ma16062444>.
9. Han, S., Yang, F., Li, Q., Sui, G., Su, X., Dai, J., & Ma, J. (2023). Tackling smoke toxicity and fire hazards of thermoplastic polyurethane by mechanochemical combination of Cu₂O nanoparticles and zirconium phosphate nanosheets. *Polymer Degradation and Stability*, 212, 110350. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2023.110350>.
10. Kodur, V., Kumar, P., & Rafi, M. M. (2020). Fire hazard in buildings: review, assessment and strategies for improving fire safety. *PSU research review*, 4 (1), 1–23. <https://doi.org/10.1108/PRR-12-2018-0033>.
11. Wi, S., Yang, S., Kim, Y. U., Kang, Y., & Kim, S. (2022). Toxicity characteristics and fire retardant performance of commercially manufactured organic insulation materials for building applications. *Construction and Building Materials*, 341, 127898. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127898>.
12. Gałaj, J. A., & Saleta, D. (2022). Toxicity of toxic gases emitted during a fire and ventilation. In *Advances in the Toxicity of Construction and Building Materials*, 81–115. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824533-0.00014-1>.
13. Lyu, C., Liu, C. M., Yu, Z. H., Yao, H., Sun, Y., & Xu, Y. Y. (2025). Thermal decomposition, fire reaction properties and smoke characteristics of carbon/epoxy sandwich laminate. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 1–9. <https://doi.org/10.1007/s10973-025-14585-y>.
14. Rudawska, A., Sarna-Boś, K., Rudawska, A., Olewnik-Kruszkowska, E., & Frigione, M. (2022). Biological effects and toxicity of compounds based on cured epoxy resins. *Polymers*, 14 (22), 4915. <https://doi.org/10.3390/polym14224915>.
15. Gurina, G., Skripinets, A., Druzhinin, E., & Saienko, N. (2024, June). Epoxy Coating Materials for Transport Protection. In *International Conference on Smart Technologies in Urban Engineering* (pp. 301–309). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-032-06832-3_25.
16. Głowacki, A., Rybiński, P., Czerwonka, G., Żukowski, W., Mirkhodjaev, U. Z., & Železik, M. (2024). Flammability, Toxicity, and Microbiological Properties of Polyurethane Flexible Foams. *Materials*, 17 (14), 3517. <https://doi.org/10.3390/ma17143517>.
17. Chulikavit, N., Huynh, T., Khatibi, A., Das, R., & Kandare, E. (2023). Thermal degradation and flame spread characteristics of epoxy polymer composites incorporating mycelium. *Scientific Reports*, 13 (1), 17812. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45097-0>.
18. Ahamad, T., & Alshehri, S. M. (2013). Thermal degradation and evolved gas analysis of epoxy (DGEBA)/novolac resin blends (ENB) during pyrolysis and combustion. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 111 (1), 445–451. <https://doi.org/10.1007/s10973-012-2431-2>.
19. Liu, C., Zong, R., Chen, H., Wang, J., & Wu, C. (2019). Comparative study of toxicity for thermoplastic polyurethane and its flame-retardant composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 32 (10), 1393–1407. <https://doi.org/10.1177/0892705718798409>.
20. Adetunji, C. O., Olaniyan, O. T., Anani, O. A., Inobeme, A., & Mathew, J. T. (2021). Environmental impact of polyurethane chemistry. *Polyurethane Chemistry: Renewable Polyols and Isocyanates*, 393–411. <https://doi.org/10.1021/bk-2021-1380.ch014>.
21. Chaudhary, M. L., & Gupta, R. K. (2025). Environmental and Health Concerns in Polyurethane. In *Non-isocyanate polyurethanes: chemistry, progress, and challenges*, 15–30. <https://doi.org/10.1021/bk-2025-1507.ch002>.
22. Shen, C., Shao, R., Wang, W., Wu, X., Zhou, B., Zhao, L., & Xu, Z. (2024). Progress of flame retardant research on flexible polyurethane foam. *European Polymer Journal*, 220, 113478. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2024.113478>.
23. Hu, J., Pan, Y. T., Zhou, K., Song, P., & Yang, R. (2024). A new way to improve the fire safety of polyurethane composites with the assistance of metal–organic frameworks. *RSC Applied Polymers*, 2 (6), 996–1012. <https://doi.org/10.1039/D4LP00257A>.
24. Gupta, R., Singh, M. K., Rangappa, S. M., Siengchin, S., Dhakal, H. N., & Zafar, S. (2024). Recent progress in additive inorganic flame retardants polymer composites: Degradation mechanisms, modeling and applications. *Heliyon*, 10 (21).
25. Chowaniec, A., Czarnecki, S., & Sadowski, Ł. (2023). Decreasing the hazardous effect of waste quartz powder and the toxicity of epoxy resin by its synergistic application in industrial coatings. *Environmental science and pollution research*, 30 (10), 25367–25381. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19772-0>.
26. Liu, C., Tao, J., Wu, T., Zhao, H. B., Yu, C., & Rao, W. (2023). Construction of hierarchical SiO₂ microcapsule towards flame retardation, low toxicity and mechanical enhancement of epoxy resins. *Chemosphere*, 342, 140184. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140184>.
27. Ou, M., Cui, J., Zhao, Z., Li, R., Guan, H., Liu, L., & Chen, X. (2023). Solvent-free intumescent fire protection epoxy coatings with excellent smoke suppression, toxicity reduction, and durability enabled by a micro/nano-structured P/N/Si-containing flame retardant. *Progress in Organic Coatings*, 183, 107762. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107762>.
28. Skripinets, A., Saienko, N., Blazhko, V., & Saienko, L. (2023). Efficiency evaluation: epoxyurethane damping inserts in vibration

protection systems. *Municipal economy of cities. Series: "Information Technology and Engineering"*, 4 (178), 17–26.

29. Roderique, J. D., Josef, C. S., Feldman, M. J., Spiess, B. D. A. (2015). Modern literature review of carbon monoxide poisoning theories, therapies, and potential targets for therapy advancement. *Toxicology*, 334, 45–58. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2015.05.004>.

30. Tabian, D., Bulgaru Iliescu, D., Iov, T., Barna, B., Toma, S. I., Drochioiu, G. (2021). Hydrogen cyanide and carboxyhemoglobin assessment in an open space fire-related fatality. *Journal of forensic sciences*, 66 (3), 1171–1175. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.14649>.

31. Tretiakova, E. V. (2006) Problem of the hypoxia in the burning toxicology. *Actual problems of transport medicine*, 4 (6), 78–85.

© Н. В. Саєнко, А. В. Скрипинець, А. І. Березовський, О. В. Макаренко

Науково-методична стаття.

Стаття надійшла до редакції 16.09.2025

Стаття прийнята 04.10.2025

Статтю опубліковано 23.12.2025



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.47.2025.12>

О. В. Хлевной, С. Я. Вовк, Н. В. Жезло-Хлевна, Д. В. Харишин
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
м. Львів, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2846-3480> – О. В. Хлевной
<https://orcid.org/0000-0001-5278-3754> – С. Я. Вовк
<https://orcid.org/0009-0005-3768-2863> – Н. В. Жезло-Хлевна
<https://orcid.org/0000-0002-0927-9998> – Д. В. Харишин
✉ olexandr.khlevnoy@gmail.com

ВПЛИВ ПРИРОДНОЇ ВЕНТИЛЯЦІЇ НА БЛОКУВАННЯ ЗА ВТРАТИ ВИДИМОСТІ ЕВАКУАЦІЙНИХ ВИХОДІВ НА ПОЧАТКОВІЙ СТАДІЇ РОЗВИТКУ ПОЖЕЖІ

Проблема. Пожежі в житлових приміщеннях становлять серйозну загрозу через швидке блокування евакуаційних виходів у зв'язку із втратою видимості на початковій стадії розвитку, що ускладнює безпечну евакуацію. Природна вентиляція суттєво впливає на поширення диму, але її роль у формуванні умов евакуації залишається недостатньо дослідженою. Це створює потребу в оцінці впливу параметрів вентиляції на поширення диму, особливо в перші хвилини після виникнення пожежі, коли видимість різко падає, а психоемоційний стан мешканців погіршує орієнтацію. Відсутність точних даних про час блокування за втратою видимості ускладнює планування евакуації та нормування вимог до сучасних систем протипожежного захисту.

Метою дослідження є визначення впливу природної вентиляції, зокрема площі відкритих дверних і віконних отворів, на час блокування в разі втрати видимості евакуаційних виходів із житлових приміщень на початковій стадії розвитку пожежі.

Методи досліджень. Дослідження ґрунтується на аналізі масиву даних, отриманих за результатами 140 числових симуляцій у програмному комплексі PyroSim, що враховували різні сценарії пожеж у житлових приміщеннях. Параметри сценаріїв передбачали зміну площі відкритих дверних (0–2 м²) і віконних (0–2,5 м²) отворів, відстані від осередку до евакуаційного виходу та форму поширення вогню (90, 180, 360°). Виконано кореляційний аналіз отриманих даних за допомогою бібліотеки Pandas. Для моделювання залежностей використано алгоритм поліноміальної регресії другого ступеня з бібліотеки машинного навчання Scikit-learn. Якість моделі оцінено за середньоквадратичною помилкою (MSE) і коефіцієнтом детермінації (R^2), а результати візуалізовано за допомогою бібліотеки Matplotlib у середовищі Google Colab.

Результати. Встановлено, що відстань від осередку до евакуаційного виходу має найбільший вплив на час його блокування за втрати видимості (кореляція 0,86), відкриті вікна дещо сповільнюють задимлення (0,32) завдяки покращенню вентиляції, а відчинені двері пришвидшують процес (–0,1) через інтенсивніший рух диму до виходу. Модель поліноміальної регресії показала високу точність ($R^2 \approx 0,93$, $MSE \approx 35,12$), що підтверджено графіками залежності часу блокування від відстані та розсіюванням прогнозованих і фактичних значень. Візуалізації показали, що форма пожежі (кут поширення) показує позитивну кореляцію із часом блокування евакуаційного виходу.

Висновки. Дослідження підтверджує, що природна вентиляція є критичним фактором, який визначає час блокування за втрати видимості евакуаційних виходів, і її врахування дає можливість ефективно прогнозувати умови евакуації. Поєднання чисельного моделювання з аналітичними методами забезпечує практичні інструменти для оцінки пожежного ризику та планування безпечної евакуації. Рекомендується подальше вивчення впливу зовнішніх факторів, як-от вітер, та інтеграція систем димо-видалення для підвищення адаптивності моделей до реальних умов. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації нормування вимог пожежної безпеки до евакуаційних шляхів і виходів.

Ключові слова: пожежна безпека, евакуація, природна вентиляція, блокування за втрати видимості, PyroSim, житлові приміщення.

THE IMPACT OF NATURAL VENTILATION ON THE BLOCKAGE OF EVACUATION EXITS DUE TO LOSS OF VISIBILITY AT THE INITIAL STAGE OF FIRE

Problem. Fires in residential premises pose a significant threat due to the rapid smoke blockage of evacuation exits during the initial development stage, complicating safe evacuation. Natural ventilation, influenced by the area of open door and window openings, plays a crucial role in smoke spread, yet its impact on evacuation conditions remains insufficiently studied. This creates a need to assess the influence of ventilation parameters on smoke propagation, especially in the first minutes after a fire starts, when visibility drops sharply and the psycho-emotional state of residents hinders orientation. The lack of precise data on smoke blockage time complicates evacuation planning and the establishment of modern fire protection system requirements.

Objective. The aim of the study is to determine the influence of natural ventilation, particularly the area of open door and window openings, on the time of smoke blockage of evacuation exits from residential premises during the initial stage of fire development.

Research Methods. The study is based on the analysis of a dataset obtained from 140 numerical simulations conducted using the PyroSim software, which modeled various fire scenarios in residential premises. The scenario parameters included variations in the area of open door (0–2 m²) and window (0–2.5 m²) openings, the distance from the fire source to the evacuation exit, and the fire spread shape (90, 180, 360°). Correlation analysis of the data was performed using the Pandas library. To model dependencies, a second-degree polynomial regression algorithm from the Scikit-learn machine learning library was applied. Model quality was evaluated using mean squared error (MSE) and the coefficient of determination (R²), with results visualized using the Matplotlib library in the Google Colab environment.

Results. It was established that the distance from the fire source to the evacuation exit has the greatest impact on the time of smoke blockage (correlation 0.86), with open windows slightly delaying smoke accumulation (0.32) due to improved ventilation, while open doors accelerate the process (–0.1) by intensifying smoke movement toward the exit. The polynomial regression model demonstrated high accuracy (R² ≈ 0.93, MSE ≈ 35.12), confirmed by graphs of the time blockage dependency on distance and scatter plots of predicted versus actual values. Visualizations also indicated that the fire spread shape (angle) shows a positive correlation with the time of evacuation exit blockage.

Conclusions. The study confirms that natural ventilation is a critical factor determining the time of smoke blockage of evacuation exits, and its consideration enables effective prediction of evacuation conditions. The combination of numerical modeling with analytical methods provides practical tools for assessing fire risk and planning safe evacuation. Further research is recommended to explore the impact of external factors, such as wind, and the integration of smoke removal systems to enhance model adaptability to real conditions. The findings can be applied to optimize fire safety standards for evacuation routes and exits.

Key words: fire safety, evacuation, natural ventilation, smoke blockage, PyroSim, residential premises.

Постановка проблеми. Пожежі в житлових будинках є однією з головних причин людських жертв і матеріальних збитків у світі. За статистикою, значна частина загиблих під час пожеж пов'язана з затримками евакуації на ранніх етапах. Найчастіше такі затримки виникають через психологічний стан мешканців, технічні несправності й недоліки систем протипожежного захисту та конструктивні особливості будівель. Перші хвилини після початку пожежі є вирішальними для порятунку життя, адже саме в цей час швидко поширення диму, підвищення температури та накопичення токсичних газів створюють умови для блокування евакуаційних шляхів і виходів. Навіть коротка затримка в кілька секунд значно підвищує ризик, особливо в багатоповерхових будівлях.

Аналіз наукових досліджень [1] свідчить, що в разі виникнення пожежі в квартирі поведінка

мешканців, які в ній перебувають, може бути різною залежно від часу доби та психоемоційного стану. В нічний час пробудження від запаху диму чи спрацювання пожежного сповісника відбувається зазвичай не раніше ніж через 30–60 секунд від моменту займання. У денний час, якщо причиною пожежі не є дії самого мешканця, час виявлення в середньому становить 20–30 секунд. Перші 10–20 секунд після виявлення приблизно 30–40 % роблять спроби ліквідувати займання, 50–60 % вибирають термінову евакуацію, а 10–20 % починають панікувати, відчиняючи вікна чи двері та погіршуючи ситуацію. Уже на другій хвилині пожежі 60–70 % людей діють раціонально й осмислено. Їх порятунок при цьому залежить від їх фізичного стану, підготовки й особливостей пожежі, що виникла. Неправильна оцінка ситуації та затримки у спробі врятувати

матеріальні цінності істотно підвищують ризик. Можна зробити висновок, що в середньому від моменту займання до його виявлення, усвідомлення небезпеки, оцінки ситуації, збору та виходу з квартири потрібно 60–120 секунд. У цьому контексті вивчення початкової стадії розвитку пожежі набуває ключового значення, оскільки саме на ній закладаються основи для успішної евакуації.

З погляду фізики та хімії горіння впродовж перших 2–3 хвилин дим є найнебезпечнішим чинником пожежі, який визначає доступність евакуаційних виходів. У разі горіння основного пожежного навантаження – дерева та синтетичних матеріалів (меблі, текстиль) – він утворюється майже миттєво та заповнює простір квартири за 1–3 хвилини. Швидке поширення диму робить його головною загрозою, оскільки втрата видимості ускладнює рух до дверей чи інших виходів. Наприклад, коли видимість падає нижче за 5–10 метрів, що відбувається раніше, ніж інші фактори досягають критичних значень, знайти вихід стає надзвичайно складно, особливо для дітей, людей похилого віку й осіб, які з різних причин не знайомі з об'ємно-планувальними рішеннями. Навіть попри те, що більшість мешканців зазвичай добре знають планування квартир, стрес під час пожежі може негативно впливати на раціональне мислення.

Інші небезпечні фактори, як-от температура, чадний газ (CO) чи вуглекислий газ (CO₂), хоч і становлять суттєву небезпеку, розвиваються повільніше або впливають на блокування виходів опосередковано та здебільшого не встигають досягати небезпечних для життя та здоров'я значень упродовж перших 120 секунд. Таким чином, аналіз закономірностей блокування евакуаційних шляхів за втрати видимості в житлових приміщеннях є пріоритетом для забезпечення пожежної безпеки на початковій стадії.

Методи машинного навчання відіграють важливу роль у таких дослідженнях, відкриваючи нові можливості для моделювання пожеж та евакуації. Завдяки здатності аналізувати складні нелінійні зв'язки й обробляти великі обсяги даних, ці методи дають змогу точно прогнозувати динаміку небезпечних факторів пожежі та їхній вплив на блокування евакуаційних шляхів і виходів.

Поєднання програмного забезпечення для моделювання пожеж, як-от PyroSim, з інструментами машинного навчання є високоефективним. PyroSim забезпечує детальне моделювання різних сценаріїв на початковій стадії, генеруючи дані про небезпечні фактори з урахуванням геометрії приміщень, матеріалів та умов вентиляції. Ці дані можуть стати джерелом для навчання моделей машинного навчання, які виявляють складні

залежності між вхідними параметрами (наприклад, форма вогню, відстань до виходу, площа відчинених дверних і віконних отворів) та цільовими показниками (час блокування за втрати видимості евакуаційних виходів). Такий підхід об'єднує точність фізичного моделювання з аналітичною силою машинного навчання, даючи можливість прогнозувати поведінку пожеж у реальному часі, оптимізувати евакуаційні стратегії та підвищувати ефективність заходів пожежної безпеки без проведення затратних експериментів.

Аналіз літературних джерел. Огляд наукових праць, пов'язаних із дослідженням впливу геометричних особливостей і природної вентиляції на початкову стадію розвитку пожежі дає змогу виділити кілька основних напрямів: чисельне моделювання поширення небезпечних чинників пожежі; застосування статистичних методів і машинного навчання для прогнозування настання певних подій (наприклад, блокування евакуаційних шляхів чи виходів тим чи іншим небезпечним чинником пожежі); комбінація чисельного моделювання та статистичних методів для вирішення завдань пожежної безпеки. Чисельне моделювання розвитку пожеж за допомогою Fire Dynamics Simulator (FDS) дає змогу досліджувати різноманітні небезпечні чинники пожежі без дорогих повномасштабних експериментів. Зокрема, роботи [2], [3], [4] і [15] зосереджені на питаннях моделювання вентиляції під час пожежі за допомогою FDS для аналізу впливу вентиляційних параметрів на поширення диму й тепла. У дослідженні [5] розроблено CFD-модель, яка враховує теплопровідність стін, швидкість виділення тепла (HRR) та геометричні параметри і дає можливість аналізувати поширення небезпечних чинників пожежі. Питанням евакуації на початковій стадії пожежі в житлових приміщеннях присвячено роботи [6] і [7], які аналізують загальні аспекти евакуації, параметри й розміри евакуаційних шляхів. Дослідження показують, що вентиляційні отвори суттєво впливають на динаміку поширення диму та тепла. У дослідженнях [8] автори за допомогою чисельного моделювання проаналізували різні сценарії відчинених дверей і вікон, довівши, що розмір і розташування отворів значно змінюють час блокування евакуаційних маршрутів. У роботах [9] і [16] досліджено вплив природної та витяжної вентиляції на поширення диму для подальшого вдосконалення протипожежних заходів.

Важливо зазначити, що для моделювання складних фізичних процесів у контексті пожежної безпеки дедалі частіше застосовується машинне навчання. Наприклад, у дослідженні [10]

нейронні мережі використано для дослідження впливу параметрів джерела займання на динаміку пожежі, а в роботі [11] згорткові нейронні мережі застосовано для визначення параметрів руху евакуаційних потоків. Дослідження [12] і [13] демонструють потенціал регресії та класифікації для оцінки типів пожеж і параметрів евакуації, забезпечуючи швидку обробку даних і адаптацію до різних сценаріїв.

Аналіз зазначених праць свідчить, що поєднання комп'ютерного моделювання, яке дає змогу генерувати великі масиви даних, із машинним навчанням, яке аналізує взаємозв'язки між цими даними, є перспективним інструментом для підвищення пожежної безпеки. Цей підхід надає можливість досліджувати вплив різних факторів на розвиток пожеж і поширення небезпечних чинників на початковій стадії та розробляти моделі для прогнозування часу блокування евакуаційних виходів.

Таким чином, **метою дослідження** є встановлення закономірностей впливу природної вентиляції на час блокування за втрати видимості евакуаційних виходів із житлових приміщень на початковій стадії пожежі, як наукового підґрунтя для підвищення ефективності оцінки пожежного ризику.

Для досягнення мети потрібно виконати такі завдання:

1. Здійснити комп'ютерне моделювання різних сценаріїв початкової стадії пожежі в житлових приміщеннях для формування бази даних, необхідної для навчання моделі поліноміальної регресії.

2. Виявити закономірності впливу форми пожежі, відстані до евакуаційного виходу та площі відчинених дверних та віконних отворів на час блокування евакуаційних виходів у житлових приміщеннях на початковій стадії пожежі.

3. Створити та протестувати модель машинного навчання для прогнозування часу блокування за втрати видимості евакуаційних виходів із квартири.

Методи досліджень. Для встановлення закономірностей впливу природної вентиляції на час блокування за втрати видимості евакуаційного виходу із житлового приміщення на початковій стадії пожежі створено набір даних із 140 сценаріїв пожеж у житлових приміщеннях. Кожен сценарій враховував час блокування за втрати видимості виходу τ , кут поширення пожежі α , відстань від осередку займання до виходу з квартири (d), а також площі відчинених дверей S_d і вікон S_v . Дані отримані шляхом моделювання різних сценаріїв займання в програмному комплексі PyroSim, яке

враховувало конфігурацію приміщень (розташування меблів, дверей, вікон), вентиляцію та місце займання, забезпечуючи надійну оцінку часу блокування для покращення пожежної безпеки.

Обробку даних виконано з використанням бібліотеки Pandas для створення загальної таблиці та кореляційного аналізу зв'язків між параметрами. Набір із 140 записів включав предиктори (α , d , S_d , S_v) та цільову змінну τ . Для прогнозування вибрано з інструментарію Scikit-learn модель поліноміальної регресії другого ступеня з огляду на її здатність моделювати нелінійні залежності. Якість оцінено за середньоквадратичною помилкою (MSE) та коефіцієнтом детермінації (R^2). Результати візуалізовано за допомогою бібліотеки Matplotlib у Google Colab.

Виклад основного матеріалу. Перший етап дослідження передбачав створення набору даних для встановлення регресійного зв'язку між геометричними особливостями пожежі, площею відчинених віконних і дверних прорізів та параметрами поширення диму. Мета полягала в кількісній оцінці впливу зовнішніх факторів на час блокування за втратою видимості евакуаційного виходу із житла, що стало основою для розробки прогностичної моделі з використанням методів машинного навчання.

Чисельний експеримент із моделювання сценаріїв виникнення пожежі проведено за допомогою програмного пакета PyroSim, який базується на Fire Dynamics Simulator (FDS) від NIST. Для цього було створено тривимірні моделі типових житлових приміщень площею 40–80 м², що мали одну, дві або три кімнати, коридор та евакуаційний вихід у коридор. Геометрія моделей передбачала стіни (товщина 0,5 м, цегляні), двері (ширина 0,9 м, висота 2 м) і вікна (площа від 0 до 2,5 м² залежно від сценарію). Усі об'єкти визначено в інтерфейсі PyroSim із використанням вбудованих інструментів для побудови обчислювальної сітки з розміром комірки 0,1 м, що забезпечило баланс між точністю й обчислювальною ефективністю для аналізу пожежних ризиків.

Наступним кроком стало встановлення параметрів сценаріїв. Джерело пожежі було змодельовано як тепловиділяючий об'єкт із початковою потужністю 200 кВт/м², що відповідає типовому джерелу на початковій стадії (наприклад, горіння меблів). Різні розміщення джерела враховували можливі варіанти осередку займання: у куті кімнати – $\alpha = 90^\circ$, біля стіни – $\alpha = 180^\circ$, у центрі кімнати – $\alpha = 360^\circ$. Площа відчинених дверей (S_d) і вікон (S_v) варіювалася в межах 0–2 м² і 0–2,5 м² відповідно, відображаючи різні умови вентиляції. Для кожного сценарію встановлено тривалість

симуляції 300 секунд із кроком 0,1 с, що дало змогу ефективно відстежувати динаміку поширення диму на ранній стадії пожежі (рис. 1).

Моделювання всіх сценаріїв відбувалося за температури повітря 20 °С, тиску 101 325 Па, а умов природної вентиляції змінювалися залежно від площі відчинених вікон і дверей. Результати симуляції, зокрема концентрація диму та видимість, фіксувалися за допомогою віртуального сенсора, розташованого поблизу евакуаційного виходу на висоті 0,5 м від підлоги (рис. 2).

Варто зазначити, що в PyroSim відсотки відображають частку світла, що поглинається димом.

Тобто 0 % означає повну прозорість повітря, а 100 % вказує на повну втрату видимості.

Час блокування τ визначався як момент, коли видимість знизилася нижче за 10 метрів, що відповідало критичній концентрації сажі, встановленій нормативними вимогами [14]. Цей поріг вважається ключовим, оскільки за таких умов орієнтація людей у приміщенні значно ускладнюється, що підвищує ризик для життя під час пожежі. Загалом проведено 140 симуляцій із різними комбінаціями параметрів, результати яких сформували набір даних для подальшого аналізу з використанням методів машинного навчання.

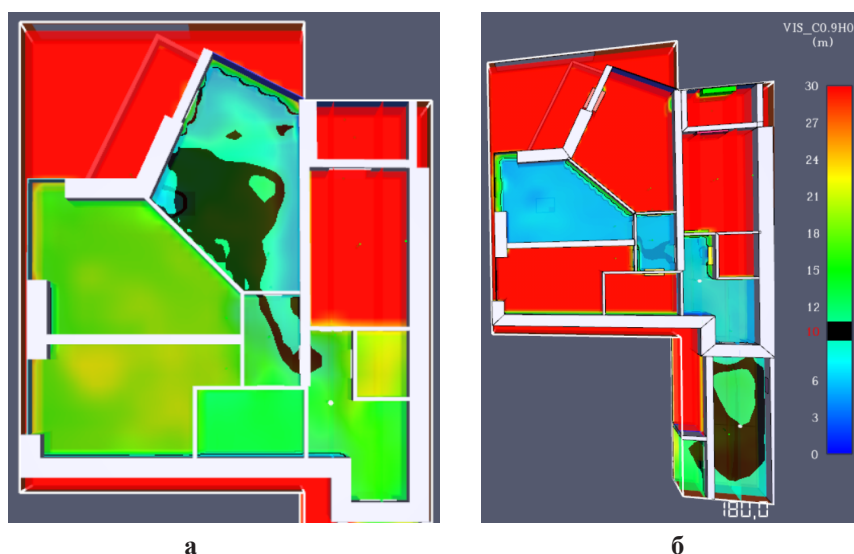


Рис. 1. Моделювання задимлення у квартирі під час виникнення пожежі у вітальні: а – відчинені двері, зачинені вікна; б – відчинене вікно, зачинені двері

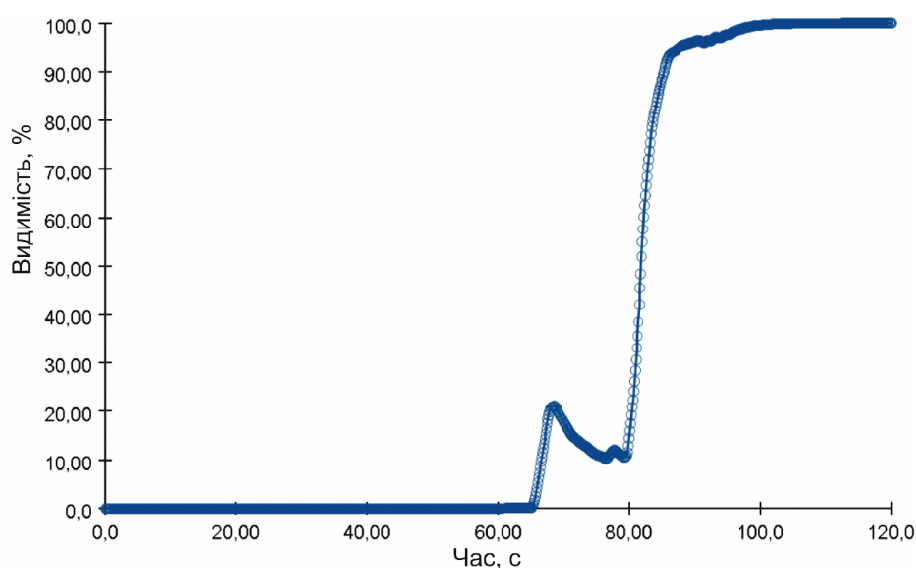


Рис. 2. Динаміка зміни видимості в зоні евакуаційного виходу з квартири площею 60 м² під час пожежі в коридорі із зачиненими вікнами та дверима

Ці симуляції враховували різноманітні сценарії, включно з різними геометричними особливостями приміщень та умовами вентиляції, що забезпечило репрезентативність даних для оцінки пожежних ризиків.

Перший етап регресійного аналізу полягав у вивченні кореляційних зв'язків між параметрами τ , α , d , S_d , S_e . Такий підхід дав змогу ідентифікувати фактори з найбільшим впливом на цільову змінну, виявити потенційні лінійні або нелінійні залежності між ними, а також оцінити ступінь колінеарності між незалежними змінними. Це стало важливим кроком для побудови точної моделі прогнозування. Результати кореляційного аналізу представлено у вигляді теплової карти, наведеної на рисунку 3, яка візуалізує зв'язки між параметрами та полегшує їх інтерпретацію для практичного застосування.

Як бачимо, найсильніше на час блокування за втрати видимості евакуаційного виходу впливає відстань до осередку пожежі (0,86), що робить цей фактор ключовим. Кут пожежі α має помітний, але менший вплив (-0,27), вказуючи, що більший кут поширення прискорює блокування. Площа відчинених вікон S_e (0,32) і дверей S_d (-0,1) впливає слабше: збільшення площі відчинених вікон уповільнює блокування, а збільшення площі відчинених дверей дещо прискорює його через вихід диму та його відведення. Варто відзначити дуже незначні значення кореляції між предикторами, що унеможлиблює мультиколінеарність.

Після кореляційного аналізу було встановлено поліноміальні ознаки другого ступеня (лінійні, квадратичні та взаємодії) за допомогою бібліотеки Scikit-learn. Дані було розділено на навчальну (80 %) і тестову (20 %) вибірки. Після навчання регресійної моделі було виконано прогнозування для тестової вибірки й оцінено якість моделі за середньоквадратичним відхиленням (MSE) та R^2 .

На коробчастих діаграмах (boxplot), представлених на рисунках 4 і 5, проілюстровано вплив форми пожежі та площі відчинених дверних і віконних отворів на час блокування за втрати видимості евакуаційного виходу. На осі X відображено варіанти кутів пожежі (90, 180° 360°) та значення площі відчинених отворів, а на осі Y – час блокування. Такий вид діаграми дає можливість відобразити медіану, квартилі та розкид даних.

На рисунку 6 представлено графік залежності часу блокування від відстані до осередку пожежі за різних форм пожежі.

У підсумку було визначено коефіцієнти поліноміальної регресії, які описують нелінійний вплив змінних (1):

$$\tau = 0,375d^2 + 0,435d \cdot S_d - 0,42d \cdot S_e - 0,05\alpha + 6,47d - 1,03S_d + 8,15S_e + 0,00015\alpha^2 - 0,007\alpha \cdot d + 0,00003\alpha \cdot S_d - 0,007\alpha \cdot S_e - 3,25S_d^2 + 0,25S_d \cdot S_e + 1,93S_e^2, \quad (1)$$

де

τ – час блокування евакуаційного виходу під час пожежі в житловому приміщенні, с;

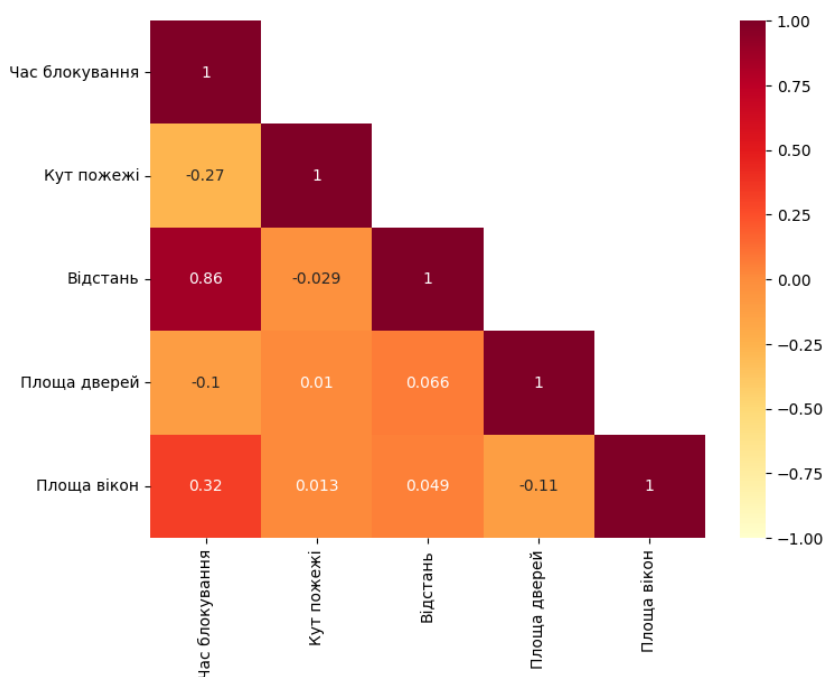


Рис. 3. Теплова карта кореляцій між параметрами

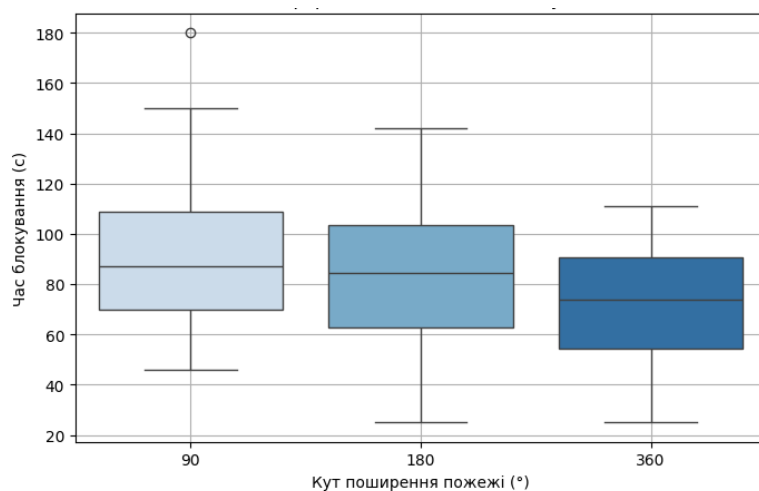


Рис. 4. Вплив форми пожежі на час блокування евакуаційного виходу за втрати видимості

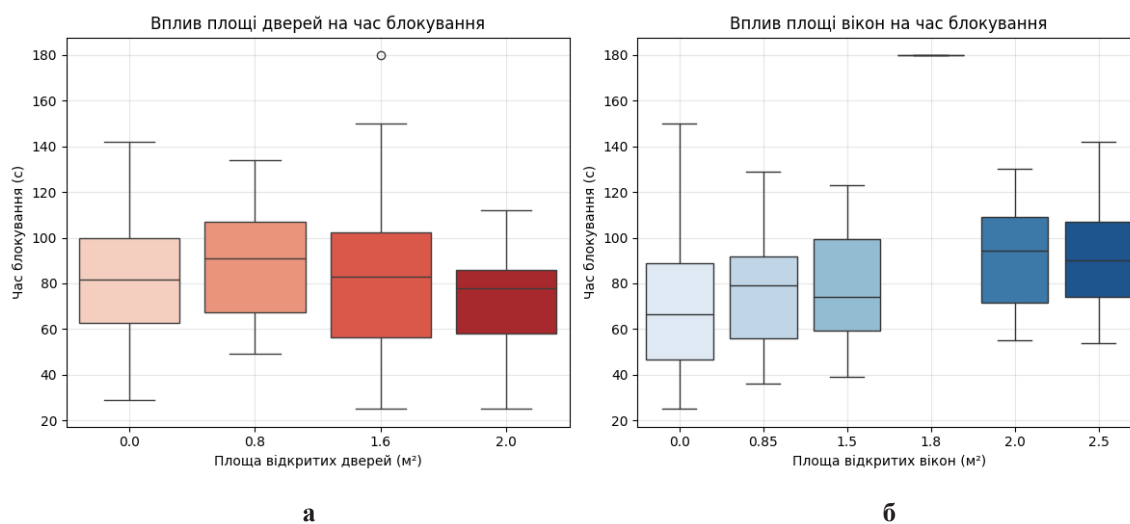


Рис. 5. Вплив площі відкритих дверних (а) і віконних (б) отворів на час блокування евакуаційного виходу за втрати видимості

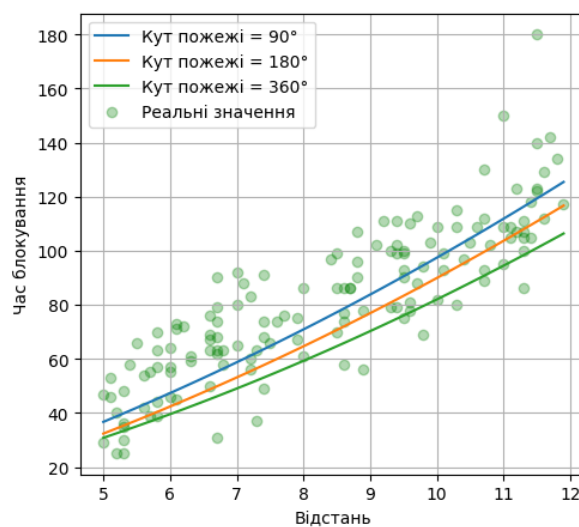


Рис. 6. Вплив відстані до осередку пожежі на час блокування евакуаційного виходу за втрати видимості

d – відстань від джерела пожежі до евакуаційного виходу, м;

α – кут поширення пожежі;

S_o – площа відчинених дверей, m^2 ;

S_g – площа відчинених вікон, m^2 .

За результатами отримано модель із високою точністю: середньоквадратична помилка (MSE) становила приблизно 35,12, а коефіцієнт детермінації (R^2) – близько 0,93.

Висновки. За результатами роботи було досягнуто поставлених цілей. Комп'ютерне моделювання різних сценаріїв пожеж у житлових приміщеннях за допомогою програмного комплексу PyroSim дало можливість сформувати репрезентативний набір даних із 140 симуляцій, що враховували відстань від джерела пожежі до виходу, кут пожежі, а також площу відчинених дверних і віконних отворів. Аналіз впливу цих факторів показав, що відстань до евакуаційного виходу є ключовим параметром (кореляція 0,86), тоді як форма пожежі (кореляція $-0,27$) та вентиляція (вікна 0,32, двері $-0,1$) мають менший, але також значущий вплив, особливо в нелінійних взаємодіях.

Модель поліноміальної регресії другого ступеня продемонструвала високу точність ($MSE \approx 35,12$, $R^2 \approx 0,93$).

Отримані результати підкреслюють критичну роль природної вентиляції в умовах евакуації та підтверджують ефективність комбінації чисельного моделювання з аналітичними методами для прогнозування умов пожежі. Рекомендується подальше дослідження впливу зовнішніх факторів, зокрема вітрового навантаження та параметрів системи димовидалення для адаптації моделей до реальних умов висотних будівель. Ці напрацювання можуть бути застосовані для оптимізації нормативів пожежної безпеки та вдосконалення планування евакуаційних шляхів і виходів у житлових будівлях.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Tanaka T. A Study on Modeling of Fire in Small Scale Buildings. Basic Model of Fire in Small Scale Buildings. *Bulletin of Japan Association for Fire Science and Engineering*. 2012. P. 51–60. DOI: 10.11196/kasai.29.2_51.
2. Yi Xin, Lei Changkui, Deng, Jun, Ma, Li, Fan, Jing, Liu, Yuanyuan Bai, Lei, Shu C.M. Numerical Simulation of Fire Smoke Spread in a Super High-Rise Building for Different Fire Scenarios. *Advances in Civil Engineering*. 2019. P. 1–11. DOI: 10.1155/2019/1659325.
3. Saber Hamed, Kashef Ahmed, Bwalya A., Loughheed G., Sultan M. A Numerical Study on the Effect of Ventilation on Fire Development in a Medium-Sized Residential Room. 2008. P. 76–88. DOI: 10.4224/20377990.
4. M. D. Lulea, V. Iordache, and I. Nastase. Numerical Model Development of the Air Temperature Variation in a Room Set on Fire for Different Ventilation Scenarios Marius Dorin Lulea, Vlad Iordache and Ilinca Năstase, *Appl. Sci.* 2021. Vol. 11, 11698. DOI: 10.3390/app112411698.
5. Li J., Beji T., Brohez S., Merci B. CFD study of fire-induced pressure variation in a mechanically-ventilated air-tight compartment. *Fire Saf. J.* 2020. Vol. 1. P. 574–583.
6. E. Guillaume, F. Didieux, A. Thiry, and A. Bellivier. Real-scale fire tests of one bedroom apartments with regard to tenability assessment. *Fire Saf. J.* 2014. Vol. 70. P. 81–97. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fire-saf.2014.08.014>.
7. Lin C. S., Wu M. E. A study of evaluating an evacuation time. *Advances in Mechanical Engineering*. 2018. Vol. 10 (4). DOI: 10.1177/1687814018772424.
8. N. Cai and W. K. Chow. Air Flow through the Door Opening Induced by a Room Fire under Different Ventilation Factors. *Procedia Eng.* 2012. Vol. 43. P. 125–131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pro-eng.2012.08.022>.
9. Y. Tong, D. Huo, P. Zhu, and X. Niu. Prediction of natural and hybrid ventilation performance used for fire-induced smoke control in a large single space, *Fire Saf. J.* 2018. Vol. 100. P. 20–31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.03.005>.
10. Hoang T. Nguyen, Yousef Abu-Zidan, Guomin Zhang, Kate T. Q. Nguyen, Machine learning-based surrogate model for calibrating fire source properties in FDS models of façade fire tests. *Fire Safety Journal*. 2022. Volume 130. <https://doi.org/10.1016/j.fire-saf.2022.103591>.
11. Khlevnoi O., Burak N., Borzov Y., Raita D. Neural network analysis of evacuation flows according to video surveillance cameras. In: Babichev, S., Lytvynenko, V. (eds.) *Lecture Notes in Data Engineering, Computational Intelligence, and Decision Making*. Springer International Publishing, 2023. P. 639–650. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16203-9_35.
12. Adriana Balboa, Arturo Cuesta, Javier González-Villa, Gemma Ortiz, Daniel Alvear. Online experiments and regression analysis of evacuation decisions in response to fire alarms. *Fire Safety Journal*. 2023. Volume 141. <https://doi.org/10.1016/j.fire-saf.2023.103954>.
13. Refaee E. A., Sheneamer A., & Assiri B. A Deep-Learning-Based Approach to the Classification of Fire Types. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14 (17), 7862. <https://doi.org/10.3390/app14177862>.
14. Пожежна безпека. Загальні положення : ДСТУ 8828:2019 [Чинний від 2020-01-01]. Вид. офіц. Київ, 2018. 163 с.
15. Луц В. І., Лазаренко О. В. Тактична вентиляція на пожежі. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2022. Т. 6, № 1. С. 53–60. <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2022.6.1.53-60>.

16. Олейник О. С., Отрош Ю. А., Рашкевич Н. В., Шаповал С. В. Моделювання можливої зони задимленості в зруйнованому укритті. *Комунальне господарство міст*. 2023. Т. 4. Вип. 178. С. 210–218. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-4-178-210-218>.

REFERENCES

1. Tanaka, T. (2012). A Study on Modeling of Fire in Small Scale Buildings. Basic Model of Fire in Small Scale Buildings. *Bulletin of Japan Association for Fire Science and Engineering*, 51–60. DOI: 10.11196/kasai.29.2_51.
2. Yi, Xin & Lei, Changkui & Deng, Jun & Ma, Li & Fan, Jing & Liu, Yuanyuan & Bai, Lei & Shu, C. M. (2019). Numerical Simulation of Fire Smoke Spread in a Super High-Rise Building for Different Fire Scenarios. *Advances in Civil Engineering*, 1–11. DOI: 10.1155/2019/1659325.
3. Saber, Hamed & Kashef, Ahmed & Bwalya, A. & Lougheed, G. & Sultan, M. (2008). A Numerical Study on the Effect of Ventilation on Fire Development in a Medium-Sized Residential Room. DOI: 10.4224/20377990.
4. Lulea, M. D., Iordache, V., & Năstase, I. (2021). Numerical model development of the air temperature variation in a room set on fire for different ventilation scenarios. *Applied Sciences*, 11 (24), Article 11698. <https://doi.org/10.3390/app112411698>.
5. Li, J., Beji, T., Brohez, S., & Merci, B. (2020). CFD study of fire-induced pressure variation in a mechanically-ventilated air-tight compartment. *Fire Safety Journal*, 1, 574–583.
6. Guillaume, E., Didieux, F., Thiry, A., & Bellivier, A. (2014). Real-scale fire tests of one bedroom apartments with regard to tenability assessment. *Fire Safety Journal*, 70, 81–97. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2014.08.014>.
7. Lin, C. S., & Wu, M. E. (2018). A study of evaluating an evacuation time. *Advances in Mechanical Engineering*, 10 (4). <https://doi.org/10.1177/1687814018772424>.
8. Cai, N., & Chow, W. K. (2012). Air flow through the door opening induced by a room fire under different ventilation factors. *Procedia Engineering*, 43, 125–131. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.08.022>.
9. Tong, Y., Huo, D., Zhu, P., & Niu, X. (2018). Prediction of natural and hybrid ventilation performance used for fire-induced smoke control in a large single space. *Fire Safety Journal*, 100, 20–31. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.03.005>.
10. Nguyen, H. T., Abu-Zidan, Y., Zhang, G., & Nguyen, K. T. Q. (2022). Machine learning-based surrogate model for calibrating fire source properties in FDS models of façade fire tests. *Fire Safety Journal*, 130, Article 103591. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2022.103591>.
11. Khlevnoi, O., Burak, N., Borzov, Y., & Raita, D. (2023). Neural network analysis of evacuation flows according to video surveillance cameras. In S. Babichev & V. Lytvynenko (Eds.), *Lecture notes in data engineering, computational intelligence, and decision making* (pp. 639–650). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16203-9_35.
12. Balboa, A., Cuesta, A., González-Villa, J., Ortiz, G., & Alvear, D. (2023). Online experiments and regression analysis of evacuation decisions in response to fire alarms. *Fire Safety Journal*, 141, Article 103954. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103954>.
13. Refaee, E. A., Sheneamer, A., & Assiri, B. (2024). A Deep-Learning-Based Approach to the Classification of Fire Types. *Applied Sciences*, 14 (17), 7862. <https://doi.org/10.3390/app14177862>.
14. Pozhezhna bezpeka. Zahalni polozhenia (2019). [National Standard of Ukraine]. *DSTU 8828:2019. Fire security. Terms* (Valid from 2020-01-01). Kyiv: Official publication. 163 p.
15. Lushch, V. I., & Lazarenko, O. V. (2022). Taktychna ventylyatsiia na pozhezhi [Tactical ventilation at fire]. *Emergency Situations: Prevention and Liquidation*, 6 (1), 53–60. <https://doi.org/10.3173/1/2524.2636.2022.6.1.53-60>.
16. Oleynyk, O. S., Otrosh, Y. A., Rashkevich, N. V., & Shapoval, S. V. (2023). Modeliuvannia mozhlyvoi zony zadymlenosti v zruinovanomu ukrytti [Simulation of a possible smoking zone in a destroyed shelter]. *Municipal Economy of Cities*, 4 (178), 210–218. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-4-178-210-218>.

© О. В. Хлевной, С. Я. Вовк, Н. В. Жезло-Хлевна, Д. В. Харишин

Науково-методична стаття.

Стаття надійшла до редакції 10.09.2025

Стаття прийнята 29.09.2025

Статтю опубліковано 23.12.2025

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

БАЛАНЮК Володимир Мірчович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, професор кафедри фізики та хімії горіння, доктор технічних наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8951-6534>

БЕРЕЗОВСЬКИЙ Андрій Іванович, Національний університет цивільного захисту України, начальник кафедри пожежної і техногенної безпеки об'єктів та технологій України, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4043-1206>

ВЕЛИКИЙ Ярема Богданович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, заступник начальника кафедри пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт, кандидат педагогічних наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3241-5211>

ВЕСЕЛІВСЬКИЙ Роман Богданович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, доцент кафедри цивільного захисту, кандидат технічних наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3266-578X>

ВОВК Сергій Ярославович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, докторант, кандидат технічних наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5278-3754>

ВОЙТОВИЧ Дмитро Петрович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, доцент кафедри пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт, кандидат технічних наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2280-5585>

ГАВРИЛЮК Андрій Федорович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, професор кафедри цивільного захисту, доктор технічних наук, доцент, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8727-9950>

ГРИГОРЕНКО Олександр Миколайович, Національний університет цивільного захисту України, доцент кафедри пожежної і техногенної безпеки об'єктів та технологій, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4629-1010>

ДОМАНСЬКИЙ Юрій Володимирович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, викладач кафедри пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0330-6420>

ДОМІНІК Андрій Михайлович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, заступник начальника факультету з навчально-наукової роботи, кандидат технічних наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0139-2002>

ЖЕЗЛО-ХЛЕВНА Наталія Володимирівна, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, викладач кафедри інформаційних технологій та систем електронних комунікацій, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3768-2863>

ЩЕНКО Іван Іванович, Національний університет цивільного захисту України, викладач кафедри пожежної і техногенної безпеки об'єктів та технологій Навчально-наукового інституту пожежної та техногенної безпеки, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5050-4926>

КАЛУЖНЯК Ігор Іванович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, ад'юнкт денної форми здобуття освіти докторантури-ад'юнктури, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1101-1403>

КИРИЧЕНКО Оксана В'ячеславівна, Національний університет цивільного захисту України, доктор технічних наук, професор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0240-1807>

КОВАЛЬ Володимир Віталійович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, ад'юнкт денної форми здобуття освіти докторантури-ад'юнктури, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5133-9542>

КОЗИРА Ігор Михайлович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, заступник начальника кафедри управління діяльністю підрозділів цивільного захисту, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-0368-2977>

КОНАНЕЦЬ Роман Миколайович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, заступник начальника кафедри пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт, доктор філософії, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2360-4002>

КОПИЛ Богдан Янович, Національний університет цивільного захисту України, аспірант кафедри пожежної і техногенної безпеки об'єктів та технологій, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2995-3927>

КУЦЕНКО Марія Анатоліївна, Національний університет цивільного захисту України, кандидат економічних наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6879-9187>

ЛАЗАРЕНКО Олександр Вікторович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, заступник начальника кафедри наглядово-профілактичної діяльності та пожежної автоматики, кандидат технічних наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0500-0598>

МАКАРЕНКО Ольга Валеріївна, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, доцент кафедри матеріалознавства та інженерії композитних конструкцій, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4125-2365>

МОТРИЧУК Роман Борисович, Національний університет цивільного захисту України, доктор філософії з пожежної безпеки, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5670-6788>

НІЖНИК Вадим Васильович, Інститут наукових досліджень з цивільного захисту, доктор технічних наук, професор, начальник науково-дослідного центру нормативно-технічного регулювання, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3370-9027>

НІКОНИШИН Олександр Вікторович, Національний університет цивільного захисту України, ад'юнкт кафедри пожежної і техногенної безпеки об'єктів та технологій, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4657-4949>

ПАРХОМЕНКО Володимир-Петро Олегович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, доцент кафедри пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт, кандидат технічних наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7431-4801>

ПАРХОМЕНКО Руслан Володимирович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, доцент кафедри пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт, кандидат технічних наук, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2954-676>

ПЕТРОВСЬКИЙ Віталій Львович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, науковий співробітник науково-дослідної лабораторії екологічної безпеки, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5323-7824>

ПИКУС Віктор Степанович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, начальник НВЦ євростандарт, аспірант, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8850-9068>

РОМАНЮК Ігор Павлович, Національний університет цивільного захисту України, кандидат технічних наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0427-5645>

САВЧЕНКО Олеся Вікторівна, Інститут наукових досліджень з цивільного захисту, аспірант, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4140-3055>

САЄНКО Наталія Вячеславівна, Національний університет цивільного захисту України, доцент кафедри пожежної і техногенної безпеки об'єктів та технологій, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4873-5316>

СКРИПИНЕЦЬ Анна Василівна, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, старший викладач кафедри хімії та інтегрованих технологій, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2340-023X>

СЛОБОДЯН Василь Ігорович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, курсант, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3163-5956>

СУДНІЩИН Юрій Тарасович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, викладач кафедри пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4218-8446>

СУКАЧ Роман Юрійович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, доцент кафедри пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт, кандидат технічних наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4174-9213>

ФРЕЮК Дмитро Васильович, Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького, здобувач вищої освіти, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7076-3431>

ХАРИШИН Дем'ян Васильович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, старший викладач-методист відділу забезпечення якості освіти, кандидат технічних наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0927-9998>

ХЛЕВНОЙ Олександр Вікторович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, доцент кафедри інформаційних технологій та систем електронних комунікацій, кандидат технічних наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2846-3480>

ХРЯПАК Сергій Олександрович, Національний університет цивільного захисту України, кандидат філологічних наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9078-976X>

ШКОЛЯР Євгеній Володимирович, Національний університет цивільного захисту України, кандидат психологічних наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7304-1677>

НОТАТКИ