



ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ БЕЗПЕКИ
ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

МАТЕРІАЛИ ДРУКУЮТЬСЯ УКРАЇНСЬКОЮ,
АНГЛІЙСЬКОЮ ТА ПОЛЬСЬКОЮ МОВАМИ

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

ПОЖЕЖНА БЕЗПЕКА

ЛДУБЖД

№ 46, 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; **Вовк С.Я.**, к.т.н., доц., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Гащук 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; **Смельяненко 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 державного управління та 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. Гедиміна, Литва; **Ярош Войцех**, PhD, Головна школа пожежної служби, Варшава, Польща.



Видавничий дім
«Гельветика»
2025

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

DOI: 10.32447/20786662.46.2025.00

ЗАСНОВНИКИ

Львівський державний університет
безпеки життєдіяльності (ЛДУБЖД)

Інститут державного управління та 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 № 10 від 04.06.2025 р.)**

Літературний редактор

Чудеснова І. М.

Комп'ютерна верстка

Клименко Т. О.

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 09.06.2025. Підписано до друку 12.06.2025.
Формат 60x84⁸. Ум. друк. арк. 15,58. Зам. № 0725/546. 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. О. Боровиков, О. М. Слуцька,
Р. Ю. Сукач, Д. П. Войтович**
ВИКОРИСТАННЯ
ПЛІВКОУТВОРЮВАЛЬНИХ
ПІНОУТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ ГАСІННЯ
ПОЖЕЖ У СВІТЛІ ПОЛОЖЕНЬ
СТОКГОЛЬМСЬКОЇ КОНВЕНЦІЇ ПРО
СТІЙКІ ОРГАНІЧНІ ЗАБРУДНЮВАЧІ

**Р. Б. Веселівський, Д. В. Смоляк,
І. М. Поліщук, А. А. Петренко**
ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
СПОСОБІВ ЗАКРІПЛЕННЯ
РЯТУВАЛЬНОЇ МОТУЗКИ
ЗА КОНСТРУКЦІЮ

**С. Я. Вовк, О. В. Шаповалов,
А. П. Кушнір, Н. О. Ференц**
АНАЛІЗ ШЛЯХІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ
ВИСОТНИХ БУДІВЕЛЬ

**Т. М. Войтович, В. В. Ковалишин,
О. П. Войтович, І. І. Калужняк**
ОГЛЯД СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
КОРОЗИЙНОЇ ДІЇ ПІНОУТВОРЮВАЧІВ
ТА ЇХ РОБОЧИХ РОЗЧИНІВ
НА ЕЛЕМЕНТИ СИСТЕМ
ПОЖЕЖОГАСІННЯ

**Н. В. Жезло-Хлевна, О. В. Хлевной,
Ю. С. Назар, Ю. О. Борзов,
В. Й. Довбняк**
ЕВАКУАЦІЯ ОСІБ ІЗ МОДУЛЬНИМИ
ПРОТЕЗАМИ НИЖНІХ КІНЦІВОК
ПРИ ПОЖЕЖІ: СУЧАСНИЙ СТАН,
ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ
ДОСЛІДЖЕНЬ

О. І. Лавренюк, Б. М. Михалічко
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ
ВИЗНАЧЕННЯ ТА МАТЕМАТИЧНЕ
МОДЕЛЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ
ГОРЮЧОСТІ ЕПОКСІАМІННИХ
КОМПОЗИЦІЙ

CONTENTS

**V. O. Borovykov, O. M. Slutska,
R. Yu. Sukach, D. P. Voytovych**
USE OF FILM-FORMING FOAMING
AGENTS FOR FIRE EXTINGUISHING
IN THE LIGHT OF THE PROVISIONS
OF THE STOCKHOLM CONVENTION
ON PERSISTENT ORGANIC
POLLUTANTS

**R. B. Veselivskyi, D. V. Smolyak,
I. M. Polishchuk, A. A. Petrenko**
STUDY OF THE EFFECTIVENESS
METHODS OF FIXING
OF THE LIFELINE
TO THE STRUCTURE

**S. Ya. Vovk, O. V. Shapovalov,
A. P. Kushnir, N. O. Ferents**
ANALYSIS OF WAYS TO PROVIDE
FIRE PROTECTION FOR HIGH-RISE
BUILDINGS

**T. M. Voitovych, V. V. Kovalyshyn,
O. P. Voitovych, I. I. Kaluzhniak**
REVIEW OF CURRENT RESEARCH
ON THE CORROSIVE EFFECTS
OF FOAM CONCENTRATES
AND THEIR WORKING SOLUTIONS
ON FIRE SUPPRESSION SYSTEM
COMPONENTS

**N. V. Zhezlo-Khlevna, O. V. Khlevnoi,
Yu. S. Nazar, Yu. O. Borzov,
V. J. Dovbniak**
EVACUATION OF PEOPLE
WITH MODULAR LOWER LIMB
PROSTHESES IN THE EVENT
OF A FIRE: CURRENT STATUS,
PROBLEMS AND RESEARCH
PROSPECTS

O. I. Lavrenyuk, B. M. Mykhalichko
EXPERIMENTAL STUDY
AND MATHEMATICAL MODELING
OF COMBUSTIBILITY INDICATORS
OF EPOXY-AMINE COMPOSITES

5

20

30

45

53

65

ЗМІСТ

**О. В. Лазаренко, Р. Ю. Сукач,
Я. Б. Великий, Б. Я. Бойчук**
ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ
ЗАСТОСУВАННЯ
ДРІБНОРОЗПИЛЕНИХ СТРУМЕНІВ
ВОДИ ПІД ЧАС ГАСІННЯ ПОЖЕЖ
У ПІДВАЛЬНИХ ПРИМІЩЕННЯХ

**В. І. Лушч, Р. М. Конанець,
Я. Б. Великий, Р. С. Ткаченко,
Н. І. Гузар**
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ
ДОСЛІДЖЕННЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ
ЖИТТЄВИХ ПОКАЗНИКІВ
ГАЗОДИМОЗАХИСНИКІВ
ПІД ЧАС ІМІТАЦІЇ ВИКОНАННЯ
ОПЕРАТИВНИХ ДІЙ НА ПОЖЕЖІ

**В. С. Мирошкін, М. З. Пелешко,
Вол. В. Ковалишин, І. С. Грідасов**
НОРМАТИВНО-ПРАВОВЕ
ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ
ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ ПОХИЛИХ
ПІДЙОМНИКІВ ДЛЯ ЕВАКУЮВАННЯ
ЛЮДЕЙ В РАЗІ ПОЖЕЖІ

**В.-П. О. Пархоменко,
Б. М. Михалічко, О. І. Лавренюк,
Р. В. Пархоменко, І.П. Кравець**
ІННОВАЦІЙНІ РОЗРОБКИ
ТА СУЧАСНІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ
ЕФЕКТИВНОСТІ ВОДНИХ
ВОГНЕГАСНИХ РОЗЧИНІВ
ЗА ДОПОМОГОЮ ІНГІБІТОРІВ

Р. Л. Пелех, В. М. Марич
АНАЛІЗ ЧИННИКІВ,
ЩО ВПЛИВАЮТЬ
НА ЕФЕКТИВНІСТЬ
СИСТЕМ ПОЖЕЖОГАСІННЯ
ТОНКОРОЗПИЛЕНОЮ ВОДОЮ

В. С. Петренко, О. М. Саух
ФОРМУВАННЯ ЦИФРОВОЇ
КУЛЬТУРИ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ
У ЗДОБУВАЧІВ ОСВІТИ ЗАСОБАМИ
E-LEARNING

**Ю. О. Терлецький, О. Ю. Пазен,
Р. М. Тацій, А. С. Лин**
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ
ПАРАМЕТРІВ ПОЖЕЖІ
НА НАГРІВАННЯ ОРІЄНТОВАНО-
СТРУЖКОВИХ ПЛИТ

CONTENTS

**O. V. Lazarenko, R. Yu. Sukach,
Y. B. Velykyi, B. Ya. Boichuk**
QUALITATIVE ASSESSMENT
OF WATER MIST JETS APPLIED
DURING EXTINGUISHING FIRES
IN BASEMENT

**V. I. Lushch, R. M. Konanets,
Ya. B. Velykyi, R. S. Tkachenko,
N. I. Huzar**
EXPERIMENTAL STUDIES
FOR DETERMINING THE VITAL
PARAMETERS OF SMOKE
DIVERS DURING SIMULATION
OF OPERATIONAL ACTIONS
AT THE FIRE

**V. S. Myroshkin, M. Z. Peleshko,
V. V. Kovalishyn, I. S. Gridasov**
REGULATORY AND LEGAL
PROVISION OF SAFETY
WHEN USING INCLINED LIFTS
FOR EVACUATION OF PEOPLE
IN THE EVENT OF FIRE

**V.-P. O. Parkhomenko,
B. M. Mykhalichko, H. I. Lavrenyuk,
R. V. Parkhomenko, I. P. Kravets**
INNOVATIVE DEVELOPMENTS AND
MODERN METHODS FOR ENHANCING
THE EFFICIENCY OF WATER-BASED
FIRE EXTINGUISHING SOLUTIONS
USING INHIBITORS

R. L. Pelekh, V. M. Marych
ANALYSIS OF FACTORS
THAT INFLUENCE
ON THE EFFICIENCY OF FIRE
EXTINGUISHING SYSTEMS WITH
FINE SPRAY WATER

V. S. Petrenko, O. M. Saukh
FORMATION OF DIGITAL FIRE
SAFETY CULTURE AMONG
STUDENTS USING E-LEARNING
MEANS

**Yu. O. Terletsnyi, O. Yu. Pazen,
R. M. Tatsiy, A. S. Lyn**
RESEARCH ON THE INFLUENCE
OF FIRE PARAMETERS
ON THE HEATING OF ORIENTED-
STAINLESS STEEL BOARDS



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.46.2025.01>

В. О. Боровиков¹, О. М. Слущка², Р. Ю. Сукач³, Д. П. Войтович³

¹ ГО «Українська федерація спеціалістів безпеки»,
м. Київ, Україна

² Національний університет цивільного захисту України,
м. Київ, Україна

³ Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
м. Львів, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6364-2428> – В. О. Боровиков

<https://orcid.org/0000-0003-1723-8181> – О. М. Слущка

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

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

✉ foam2000@gmail.com

ВИКОРИСТАННЯ ПЛІВКОУТВОРЮВАЛЬНИХ ПІНОУТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ У СВІТЛІ ПОЛОЖЕНЬ СТОКГОЛЬМСЬКОЇ КОНВЕНЦІЇ ПРО СТІЙКІ ОРГАНІЧНІ ЗАБРУДНЮВАЧІ

Проблема. Прийнята 2001 року Стокгольмська конвенція про стійкі органічні забруднювачі встановила низку обмежень щодо виробництва і використання численних хімічних речовин, перелік яких розширюється за ступенем внесення змін до неї. До таких речовин належать і численні фторорганічні сполуки, у тому числі частина фторвмісних речовин, використовуваних у рецептурах плівкоутворювальних піноутворювачів для гасіння пожеж. Водночас обмеження або заборони щодо їх використання можуть призвести до зниження рівня протипожежного захисту об'єктів з наявністю горючих рідин.

Мета. Метою роботи було визначення кола задач, розв'язання яких забезпечить виконання вимог Стокгольмської конвенції про стійкі органічні забруднювачі без зниження рівня протипожежного захисту об'єктів стаціонарними системами пінного пожежогасіння.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження. Аналізуванню піддавали інформацію щодо токсичності фторвмісних та кремнійорганічних ПАР, а також піноутворювачів, їх біологічного розкладання, технологій знешкодження таких речовин та їх видалення з природних середовищ і переходу на безпечніші для довкілля плівкоутворювальні піноутворювачі, подану в наукових публікаціях і нормативних документах.

Основні результати дослідження. Встановлено, що нині плівкоутворювальні піноутворювачі незамінні в системах пожежогасіння «підшаровим» способом. З'ясовано, що наявні і потенційні альтернативи плівкоутворювальним піноутворювачам, що не містять фторорганічних сполук, придатні для використання в інших випадках, можуть бути не менш токсичними і такими, які повільно розкладаються в природних умовах. Виявлено перспективні технології видалення фторвмісних складників піноутворювачів, що потрапили в природні екосистеми, та їх знешкодження. Обґрунтовано можливість розроблення рецептур плівкоутворювальних піноутворювачів з прийнятними показниками токсичності і здатності до біологічного розкладання.

Висновки. За результатами проведених досліджень показано, що плівкоутворювальні піноутворювачі є найефективнішими засобами гасіння неполярних горючих рідин, а можливість реалізації технології пожежогасіння «підшаровим» способом без їх використання досі не підтверджено. З'ясовано, що показники токсичності і здатності до біологічного розкладання різноманітних фторвмісних хімічних речовин, а також піноутворювачів, в яких вони використовуються, можуть значною мірою різнитися. За результатами проведених аналітичних досліджень виявлено, що швидкість руйнування таких речовин в природних екосистемах суттєво залежить від виду і низки характеристик останніх, а піноутворювачі, що не містять фторорганічних речовин, можуть не бути безпечнішими для довкілля. Також з'ясовано, що у світі розроблено технології ефективного знешкодження залишків плівкоутворюваль-

них піноутворювачів, що потрапили в об'єкти довкілля, та обґрунтовано можливість виконання вимог Стокгольмської конвенції без відмови від плівкоутворювальних піноутворювачів для гасіння пожеж.

Ключові слова: біологічне розкладання, гасіння пожеж, знешкодження, мікрофлора, піноутворювач, поверхнево-активна речовина, система пожежогасіння, стійкий органічний забруднювач, токсичність, фторвмісна сполука.

V. O. Borovykov¹, O. M. Slutska², R. Yu. Sukach³, D. P. Voytovych³

*¹Ukrainian Federation of Security Experts,
Kyiv, Ukraine*

*²National University of Civil Protection of Ukraine,
Kyiv, Ukraine*

*³Lviv State University of Life Safety,
Lviv, Ukraine*

USE OF FILM-FORMING FOAMING AGENTS FOR FIRE EXTINGUISHING IN THE LIGHT OF THE PROVISIONS OF THE STOCKHOLM CONVENTION ON PERSISTENT ORGANIC POLLUTANTS

Introduction. The Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants which was adopted in 2001 has established a number of restrictions on the production and use of numerous chemicals, the list of which is expanding as amendments are made to it. Such substances include numerous organofluorine compounds, including some of the fluorine-containing substances used in formulations of film-forming foam concentrates for fire-fighting. At the same time, restrictions or bans on their use may lead to a decrease in the level of fire protection of facilities with the presence of flammable liquids.

Purpose. The purpose of the work was to determine the range of the tasks solution of which will ensure compliance with the requirements of the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants without reducing the level of fire protection of facilities with fixed foam fire-fighting systems.

Methods. We conducted desk studies. We analyzed information on the toxicity of fluorinated and organosilicon surfactants as well as foam concentrates, their biodegradation, technologies for neutralizing such substances and removing them from natural environments, as well as the transition to environmentally more sound film-forming foam concentrates being presented in appropriate scientific publications and regulatory documents.

Results. We established that film-forming foam concentrates were indispensable at present in fire-fighting systems employing the “subsurface” application method. It was found that existing and potential alternatives to film-forming foam concentrates containing no organofluoride compounds, suitable for use in other cases, might be no less toxic and be slowly degraded in natural conditions. Promising technologies for the extraction of fluorinated components of foam concentrates that have entered natural ecosystems and their disposal have been identified. The possibility of developing formulations of film-forming foam concentrates with acceptable toxicity and biodegradability performance was substantiated.

Conclusion. The results of the research having been conducted show that film-forming foam concentrates are the most efficient means of quenching non-polar flammable liquids, and the possibility of implementing “subsurface” application technology of fire-fighting without their use has not been confirmed so far. It was found that the toxicity and biodegradability performance of various fluorinated chemicals, as well as foam concentrates in which they are used, could differ significantly. It was revealed as result of desk studies having been conducted that the rate of degradation of such substances in natural ecosystems significantly depended on the type and a number of characteristics of the latter, but foam concentrates that do not contain organofluoride substances might not be more environmentally sound. We also revealed that a number of technologies were developed in the world for efficacious neutralization of residues of film-forming foam concentrates that have entered environmental objects, and the possibility of fulfilling the requirements of the Stockholm Convention without abandoning film-forming foam concentrates for fire-fighting has been substantiated.

Key words: biodegradation, fire-fighting, neutralization, microflora, foam concentrate, surfactant, fire-fighting system, persistent organic pollutant, toxicity, fluorinated compound

Постановка проблеми. Як відомо, основним засобом гасіння пожеж на об'єктах видобування та переробляння нафти, а також зберігання нафти і нафтопродуктів є піна. З часів появи ідеї щодо гасіння горючих рідин піною та перших спроб її реалізації як самі речовини, з яких отримували

піну, так і способи її одержання подолали тривалий шлях еволюції і зазнали низки принципових змін. Способи генерування піни в результаті перебігу хімічних реакцій і спінювання відповідних водних розчинів залишилися в минулому, натомість повсюдного застосування набуло генерування

повітряно-механічної піни з робочих розчинів піноутворювачів – концентратів, що складаються з поверхнево-активних речовин (ПАР), функціональних добавок і води [1]. До всіх типів піноутворювачів для гасіння пожеж, передбачених класифікацією [2–4], останніми роками додали водопінні вогнегасні речовини, які позначають як “F3” – це піноутворювачі, які розраховано на забезпечення відповідності класам за вогнегасною ефективністю і цільове застосування, подібне до піноутворювачів типів AFFF і (або) AR, без використання фторорганічних сполук. Основою цих піноутворювачів є суміші вуглеводневих ПАР і стабілізаторів, що не містять атомів фтору.

Як відомо, відомі типи піноутворювачів відрізняються перш за все хімічною природою поверхнево-активної основи і, відповідно, технологіями виробництва. Різна хімічна природа їхньої основи зумовлює суттєві відмінності у фізико-хімічних та реологічних властивостях таких піноутворювачів та їх робочих розчинів, отже, їх придатності для генерування піни низької та/або середньої та/або високої кратності з використанням тих чи інших технічних засобів. Не дивно, що й сама піна характеризується розмаїттям особливостей залежно від використовуваного піноутворювача і застосовуваних технологій та обладнання для її генерування. Відповідно, переважні сфери застосування піноутворювачів різних типів також значною мірою відрізняються.

Отже, для генерування піни в усіх випадках використовуються піноутворювачі з вмістом ПАР, більшість яких у природі не зустрічаються. Це стосується синтетичних вуглеводневих, фторвмісних ПАР, кремнійорганічних сполук і навіть ПАР, що є основою протеїнових піноутворювачів та виготовляються із сировини природного походження. Очевидно, що будь-яка хімічна речовина, тим більше така, що не зустрічається в природі, може характеризуватися високою стійкістю в об'єктах довкілля, водночас справляючи шкідливий вплив на живі організми. Чи не найбільше проблем пов'язано з плівкоутворювальними піноутворювачами, які містять (можуть містити) фторвмісні сполуки, що регулюються Стокгольмською конвенцією про стійкі органічні забруднювачі (СОЗ) [5], ратифікованою, зокрема, Україною (Закон України від 18 квітня 2007 року).

До прийняття 2001 року Стокгольмської конвенції про стійкі органічні забруднювачі (Persistent Organic Pollutants – POPs), а також низки подальших змін до неї спонукало усвідомлення того, яку небезпеку являє собою велика кількість органічних сполук, що мають високі показники токсичності та хімічної стійкості, для довкілля та людини. Ця Конвенція стала однією з міжнародних угод, спрямованих на послаблення антропогенного впливу на довкілля. До початкового списку регульованих нею речовин входила низка високотоксичних пестицидів (ДДТ, хлордан, токсафен тощо), поліхлоровані біфеніли, а також поліхлоровані дібензодіоксини та дібензофурані. В подальшому список СОЗ, виробництво і використання яких регулюється Стокгольмською конвенцією (зокрема, додатками А, В до неї), неодноразово доповнювався, в ньому з'явилися деякі фторвмісні сполуки, а обмеження щодо використання стійких органічних забруднювачів з часом ставали все жорсткішими. Серед цих сполук розрізняють поліфторовані (тобто такі, в яких частину атомів гідрогену (водню), зв'язаних з атомами карбону (вуглецю), заміщено атомами флуору (фтору)), і перфторовані (тобто такі, в яких атомами флуору (фтору) заміщено всі атоми гідрогену (водню)). Саме перфторовані сполуки мають найвищу стійкість, і використання частини з них обмежене або заборонене Стокгольмською конвенцією.

Наприклад, серед таких речовин наразі є перфтороктансульфонова кислота (рис. 1 (а)) включно з ізомерами, її похідні, а також сполуки, в результаті руйнування яких названі речовини утворюються. Конвенцією заборонено як виробництво, так і використання таких речовин. Щодо перфтороктанової кислоти (рис. 1 (б)), її ізомерів та похідних, які донедавна повсюдно використовувалися в рецептурах плівкоутворювальних піноутворювачів для гасіння пожеж, то їх виробництво для використання у складі водопінних вогнегасних речовин наразі заборонено, натомість використання наявних запасів з дотриманням установлених обмежень сьогодні дозволено.

Обмеження і навіть заборона на використання та/або виробництво багатьох таких речовин спричинили спроби створити замінники плівкоутворювальних піноутворювачів, що не містять таких сполук (зокрема, піноутворювачів типу F3).

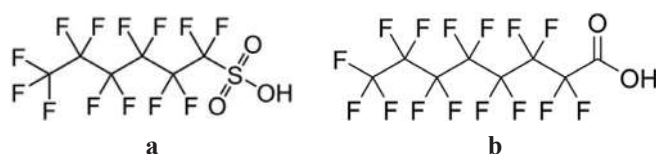


Рис. 1. Структурні формули молекул перфторгексансульфонової (а) і перфтороктанової (б) кислот

Натомість залишається відкритим питання, чи застосовні такі замітники в пожежогасінні повсюдно.

Також актуальними є питання, пов'язані з оцінюванням впливу синтетичних фторвмісних сполук, якими забруднено об'єкти довкілля, на живі організми, і пошуком шляхів видалення таких забруднень. Не менший інтерес являє собою пошук більш безпечних фторорганічних ПАР, придатних для використання у складі плівкоутворювальних піноутворювачів. Можна очікувати, що винайдення таких альтернатив, а також розроблення ефективних методів знешкодження небезпечних фторвмісних складників плівкоутворювальних піноутворювачів, які потрапили в об'єкти довкілля, дадуть змогу не посилювати обмеження/не встановлювати заборони щодо використання відповідних ПАР у рецептурах піноутворювачів під час внесення подальших змін і доповнень до Стокгольмської конвенції. В такому разі можна буде й надалі реалізовувати всі переваги, які забезпечує застосування плівкоутворювальних піноутворювачів у пожежогасінні.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Відомо, що гасіння горючих рідин піною відбувається переважно за рахунок ізолювання їхніх поверхонь від кисню повітря, а також охолодження поверхневих, а іноді й глибинних шарів горючих рідин. Завдяки такому ізолюванню інтенсивність дифузії горючих парів у газову фазу значною мірою знижується, в результаті чого вона збіднюється на горючі речовини. Як наслідок, за належних інтенсивності, способу і тривалості подавання піни горіння рідини припиняється. Водночас, потрапляючи на поверхню горючої рідини, піна руйнується не тільки через надлишкову енергію її як дисперсної системи, але й під впливом самої горючої рідини (десорбції молекул ПАР з пінних плівок, їх контактного втягування в об'єм рідини), а також унаслідок теплового впливу (нагрівання під час контактування з горючою рідиною, теплового випромінювання полум'я тощо). Внесок кожного з цих чинників залежить від природи і хімічного складу горючої рідини, її кількості і тривалості вільного горіння, різновиду піноутворювача, обладнання, використовуваного для генерування і подавання піни, та інших параметрів.

Гасіння горючої рідини піною теоретично можливе, якщо швидкість надходження піни на палаючу поверхню ($\text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$) перевищує швидкість її руйнування, а тривалість подавання піни достатня для ізолювання та (або) охолодження горючої рідини такою мірою, щоб забезпечувалося припинення її горіння. На практиці ж гасіння

горючих рідин навіть за дуже високої інтенсивності подавання робочого розчину піноутворювача (питомої витрати піни) може бути неможливим через наявність перешкод для покриття піною всією поверхнею рідини. Доволі типовими прикладами є часткове занурення стаціонарних покрівель резервуарів у рідину через їх пошкодження вибухами, з яких зазвичай починаються пожежі на таких об'єктах. В результаті утворюються закриті зони з незалежним від основної маси рідин тепло- і масообміном, подати піну в які традиційними способами або без вжиття додаткових і вкрай небезпечних заходів не вдається. Чи не складнішими можуть бути випадки, коли через тривале горіння нафти (нафтопродукту) відбувається затоплення понтону або плаваючої покрівлі резервуарів, які ними споряджено [1; 6].

Свого часу справжній прорив у пінному пожежогасінні стався з появою плівкоутворювальних піноутворювачів (класів AFFF та FFFP, про які вже йшлося вище). За наявними даними [1], винахідником перших зразків таких вогнегасних речовин була компанія «3М» (США), яка також першою синтезувала фторвмісні ПАР – речовини, що пізніше набули повсюдного застосування в різноманітних галузях, і ввела їх до рецептур піноутворювачів. На відміну від решти видів ПАР, фторвмісні сполуки здатні знижувати поверхневий натяг водних розчинів до значень, нижчих за поверхневий натяг вуглеводнів. За таких умов виникає термодинамічна можливість утворення тонкої (товщиною до приблизно 40 мкм) водної плівки, що формується під час руйнування піни на поверхні вуглеводневої рідини [1; 7; 8]. Така плівка, постійно оновлюючись у процесі поступового руйнування піни, ізолює поверхню горючої рідини, охолоджує її та пригнічує випаровування рідини. В результаті досягається не тільки припинення горіння, але й захист рідини від повторного запалювання під впливом теплового випромінювання від нагрітих будівельних конструкцій.

Дані щодо порівняльної вогнегасної ефективності та ізолювальної здатності піни, генерованої з робочих розчинів сучасних піноутворювачів різних типів, подано в табл. 1. І клас у цій таблиці відповідає найвищій, III клас – найнижчій вогнегасній ефективності піни. Аналогічно рівень А означає найвищий опір піни повторному запалюванню рідини, а рівень С – найнижчий рівень цього опору.

Легко побачити, що плівкоутворювальні (як фторсинтетичні, так і фторпротеїнові) піноутворювачі характеризуються найвищою вогнегасною ефективністю. Більш того, аналізування технічних описів, складених виробниками численних

Типові показники вогнегасної ефективності та ізолювальної здатності піни, генерованої з робочих розчинів піноутворювачів, під час гасіння вуглеводневих рідин (за даними [2])

Тип піноутворювача	Клас за вогнегасною ефективністю	Рівень опору повторному запалюванню	Плівкоутворювальна здатність
AFFF (не AR)	I	C	Наявна
AFFF (AR)	I	A або B	Наявна
FFFP (не AR)	I	B	Наявна
FFFP (AR)	I	A або B	Наявна
FP (не AR)	II	A або B	Відсутня
FP (AR)	II	A або B	Відсутня
P (не AR)	III	B	Відсутня
P (AR)	III	B	Відсутня
S (не AR)	III	C	Відсутня
S (AR)	III	C	Відсутня
F3 (не AR)	I або II	C	Відсутня
F3 (AR)	I або II	B/C	Відсутня

піноутворювачів, а також результати експериментальних досліджень, проведених авторами, свідчать про існування великої кількості піноутворювачів класу AFFF, що характеризуються найвищим (A, а не B і тим більше не C) рівнем опору повторному запалюванню. Це наводить на думку про можливу друкарську помилку, припущену в європейських нормах, на основі яких прийнято серію національних стандартів [2].

З цієї таблиці також видно, що піна, генерована з робочих розчинів «спиртостійких» піноутворювачів, за інших однакових умов у середньому ефективніша за піну, генеровану з піноутворювачів тієї самої хімічної природи, які для гасіння полярних рідин непридатні. Це пояснюється додатковою стабілізацією пінних шарів і водних плівок водорозчинними полімерами з тікостропними властивостями, що зазвичай використовуються у складі «спиртостійких» піноутворювачів [1; 7; 8].

Плівкоутворювальні піноутворювачі зазвичай використовують для гасіння саме горючих рідин, генеруючи з їх робочих розчинів піну низької кратності [9; 10]. Наявність плівкоутворювальної здатності в таких розчинів зумовлює відносно слабке контактне втягування і, відповідно, змішування та забруднення одержаної з них піни вуглеводневими рідинами. З цієї причини «плівкоутворювальна» піна характеризується найвищою вогнегасною ефективністю. Саме це свого часу спонукало дослідників здійснити спроби її подавання на гасіння не тільки з нанесенням на поверхню горючої рідини, але й з нагнітанням піни безпосередньо в шар нафти (нафтопродукту) через технологічні трубопроводи резервуарів або так звані пінопроводи. Такий спосіб, що виявився успішним, назвали підшаровим.

Спливаючи крізь шар неполярної горючої рідини, піна, одержана з робочих розчинів

плівкоутворювальних піноутворювачів, відносно слабо забруднюється вуглеводнями та зберігає вогнегасну ефективність. Надалі відбувається розтікання піни поверхнею палаючої рідини з її покриванням пінним шаром і подальшим гасінням. Введення піни «підшаровим» способом дає змогу подати її навіть у закриті зони, що утворилися через пошкодження конструкцій резервуара внаслідок пожежі, і забезпечити припинення горіння. Такий спосіб гасіння пожеж у резервуарах безпечніший за гасіння «поверхневим» способом, виключає можливість пошкодження обладнання системи пожежогасіння вибухами та полум'ям, а також унеможливорює винос піни за межі резервуара вітром і конвекційними потоками продуктів згорання (що може бути у разі застосування лафетних стволів).

З іншого боку, застосовність «підшарового» способу гасіння пожеж у резервуарах обмежена. Так, чинні в Європі норми, прийняті в Україні як ДСТУ EN 13565-2 [9], прямо забороняють використання задля цього піноутворювачів, що не мають плівкоутворювальних властивостей. Це зумовлено високою інтенсивністю змішування піни, одержаної з їх робочих розчинів, з вуглеводневими рідинами. Крім того, чинні норми [9] забороняють (п. 5.2.4) застосування «підшарового» способу для гасіння полярних горючих рідин (спиртів, кетонів, деяких сумішевих розчинників тощо), як неполярних горючих рідин з температурою спалаху нижче +25 °C і точкою кипіння нижче за +40 °C. Фактично це означає можливість гасіння «підшаровим» способом більшості сортів нафти і темних нафтопродуктів та неможливість гасіння таким чином, наприклад, автомобільного бензину і деяких сортів дизельного та іншого палива. Річ у тім, що струмені піни, що піднімаються крізь шар горючої рідини, неодмінно

виносять певну кількість цієї рідини на поверхню, а буруни, що утворюються в цей час на ній, не дають змоги покрити горючу рідину шаром піни належної товщини, за якої можливе припинення горіння. І якщо важку нафту та нафтопродукти з температурою спалаху вище $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ і точкою кипіння вище за $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ для гасіння достатньо охолодити піною до температури довкілля, то в разі легких нафти та нафтопродуктів досягти цього за подавання піни «підшаровим» способом практично неможливо.

Спроби застосування для гасіння «підшаровим» способом звичайних вуглеводневих піноутворювачів тривають. Певні успіхи, досягнуті в лабораторних умовах, описано в дисертаційній роботі [11]. Зокрема, в результаті експериментів установлено, що подавати робочі розчини таких піноутворювачів на гасіння «підшаровим» способом необхідно з інтенсивністю не нижче ніж $0,135\text{ л/м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. Натомість чинні у США і Канаді норми NFPA 11 [10] забороняють введення піни під шар горючих рідин за інтенсивності подавання робочого розчину піноутворювача більше ніж $0,14\text{ л/м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. Це зумовлено надмірною турбулізацією потоків і створенням умов, не сприятливих для припинення горіння рідини (навіть у разі використання плівкоутворювальних піноутворювачів). Як видно, ці дві величини практично збігаються. Натурні випробування з використанням синтетичних піноутворювачів та реалізацією пропонованих параметрів не проводили, що зумовлює відсутність належних підстав для ствердних висновків про можливість застосування піноутворювачів, що не мають плівкоутворювальних властивостей, для гасіння горючих рідин «підшаровим» способом. Іншими словами, необхідні подальші дослідження. Жодних результатів, які б спростовували вищезгадані заборони щодо використання вуглеводневих піноутворювачів для гасіння «підшаровим» способом, в інших літературних джерелах також не знайдено.

На підставі викладених фактів можна стверджувати, що плівкоутворювальні піноутворювачі (звичайні або «спиртостійкі») сьогодні, безумовно, є найефективнішими засобами гасіння неполярних горючих рідин (здебільшого нафти і нафтопродуктів), що зберігаються в резервуарах, як «поверхневим», так і «підшаровим» способом. Решта видів піноутворювачів для гасіння «поверхневим» (і, можливо, «напівпідшаровим») способом також придатні, але вони здебільшого менш ефективні. Одержані досі дані не дають підстав для ствердних висновків про можливість застосування піноутворювачів, що не мають плівкоутворювальних властивостей, для гасіння горючих

рідин «підшаровим» способом. Нарешті, авторам цієї роботи не доводилося бачити жодного технічного опису жодного піноутворювача, що не має плівкоутворювальних властивостей, в якому його виробник декларував би (як це передбачають норми [2; 9]) придатність такого піноутворювача для гасіння рідин «підшаровим» способом. Відповідно, до нормативного врегулювання зазначеного питання можна буде вдатися тільки у разі належного експериментального підтвердження придатності піноутворювачів, які не мають плівкоутворювальних властивостей, для гасіння «підшаровим» способом.

Іншими словами, альтернативи плівкоутворювальним піноутворювачам під час гасіння горючих рідин «підшаровим» способом наразі не існує, а їх гасіння «поверхневим» способом із застосуванням піноутворювачів, що не мають плівкоутворювальних властивостей, може бути менш ефективним. Як вже зазначалося, однією з переваг «підшарового» способу гасіння є можливість гасіння пожеж в резервуарах за наявності зон з незалежним від основної маси рідин тепло- і масообміном, гасіння яких подаванням піни безпосередньо на поверхню рідини вкрай складне або навіть неможливе. Отже, повна відмова від плівкоутворювальних піноутворювачів наразі якщо й можлива, то однаково пов'язана з негативними наслідками для ефективності протипожежного захисту деяких об'єктів. Тому актуальними залишаються питання, пов'язані з усіма аспектами мінімізації шкідливого впливу плівкоутворювальних піноутворювачів на довкілля задля забезпечення можливості їх подальшого використання в пожежогасінні.

З огляду на викладене **метою роботи** було визначення кола задач, розв'язання яких забезпечить виконання вимог Стокгольмської конвенції про стійкі органічні забруднювачі без зниження рівня протипожежного захисту об'єктів стаціонарними системами пінного пожежогасіння.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети проводили теоретичні дослідження. Аналізуванню піддавали інформацію щодо токсичності фторвмісних та кремнійорганічних ПАР, а також піноутворювачів, їх біологічного розкладання, технологій знешкодження таких речовин та їх видалення з природних середовищ, а також переходу на безпечніші для довкілля плівкоутворювальні піноутворювачі, подану в наукових публікаціях і нормативних документах.

Результати роботи. Цілком очевидно, що очікувати послаблення вимог Стокгольмської конвенції навряд чи варто. Отже, за інших однакових умов доцільно принаймні розглядати питання

щодо можливої відмови від піноутворювачів, що містять фторвмісні ПАР (особливо у випадках, коли вони не мають плівкоутворювальних властивостей). Така відмова передбачає перехід на використання вогнегасних речовин, які не мають у своєму складі хімічних речовин, що регулюються зазначеною Конвенцією, в ідеалі – піноутворювачів, які не містять жодних фторвмісних сполук. Залежно від передбачуваної сфери застосування, це можуть бути як плівкоутворювальні (AFFF, FFFP) піноутворювачі, так і піноутворювачі, що не містять фторвмісних сполук (в тому числі, типу F3), тобто такі, які розраховано на забезпечення відповідності класам за вогнегасною ефективністю і цільове застосування, подібне до піноутворювачів типів AFFF і (або) AR [2]. Як вже зазначалося, такі вогнегасні речовини не містять фторорганічних (як поліфторованих, так і перфторованих) хімічних речовин органічної природи, які в науково-технічній літературі зазвичай позначають збиральною аббревіатурою “PFAS”. Залишається зазначити, що інформацію щодо переліку складників піноутворювачів для гасіння пожеж, а також небезпечності цих складників наводять їхні виробники в паспортах безпечності (Material Safety Data Sheet – MSDS), вимоги щодо яких в Україні регламентовано стандартом [12].

Висока хімічна стійкість фторвмісних органічних хімічних сполук зумовлює можливість їх тривалого існування в природних екосистемах та переміщення на великі відстані. Так, наприклад, гасіння пожеж із застосуванням плівкоутворювальних піноутворювачів може призводити до надходження фторвмісних речовин в системи каналізації, водойми та ґрунтові води, а також ґрунти. В подальшому ці речовини можуть виявлятися на значній віддалі від місця первинного надходження в об'єкти довкілля в ґрунтах і водоймах (зокрема, у донних відкладах водойм), в тому числі в джерелах господарсько-питного водопостачання [13]. Аналогічні дані наводять автори роботи [14]. Крім того, в дослідженні [15] виявлено високу забрудненість ґрунтів на тренувальному полігоні навіть через 15 років після припинення навчань з використанням фторсинтетичних плівкоутворювальних піноутворювачів. Цілковито природно, що наявність поверхнево-активних властивостей може зумовлювати адсорбцію таких речовин на ґрунтах, різноманітних речовинах і матеріалах, а також технологічному обладнанні (в тому числі, на очисних спорудах). Відповідно, наявність високих концентрацій фторвмісних речовин у ґрунтах на цьому полігоні дивними не здається.

Також варто зазначити, що фторвмісні ПАР можуть залишатися у великих кількостях

і в трубопроводах стаціонарних систем пожежогасіння після заміни плівкоутворювального піноутворювача іншою вогнегасною речовиною [16]. Тоді промивання системи може бути недостатнім, і для практично повного видалення залишків фторвмісних ПАР можуть знадобитися спеціальні мийні засоби, оброблення лужними розчинами і температурні впливи. Подібні маніпуляції необхідні задля уникнення забруднення нового піноутворювача (зазвичай класу F3) залишками старого піноутворювача класу AFFF, яке може супроводжуватися зниженням показників вогнегасної ефективності нової вогнегасної речовини [16]. Водночас промивання стаціонарної системи пожежогасіння неодмінно супроводжуватиметься утворенням значної кількості рідких відходів, які також потребуватимуть знешкодження.

Серед численних наукових робіт, присвячених дослідженню забруднення довкілля фторвмісними ПАР, варто назвати дослідження [17], у якому йдеться про біологічне перетворення однієї з фторвмісних речовин (фтортеломерного спирту), що використовується у складів синтетичних плівкоутворювальних піноутворювачів, в аеробних (з доступом кисню повітря) умовах після забруднення нею ґрунтів. Актуальність досліджень автори мотивують тим, що фторвмісні речовини антропогенного походження виявляють навіть в атмосферному повітрі. Крім того, відзначено їх накопичення в очисних спорудах, зокрема в активному мулі, очищених стічних водах, що скидаються з них, донних відкладах водойм і, звичайно ж, у надлишковому мулі, який періодично видаляють з очисних споруд з подальшим розміщенням на полях фільтрації, відповідних полігонах, могильниках чи звалищах. Водночас у результаті експериментів встановлено можливість доволі швидкого розкладання дослідженої речовини аборигенною мікрофлорою ґрунтів. Відповідно, автори з'ясували складність руйнування дослідженої фторвмісної речовини на біологічних очисних спорудах, а також отримали нові дані про можливість її руйнування певними видами ґрунтової мікрофлори. Ці дані можуть стати корисними під час подальших прикладних досліджень, спрямованих на розроблення технологій знешкодження подібних сполук в об'єктах довкілля.

Високу стійкість синтетичних фторвмісних речовин в природних умовах можна пояснити насамперед високою енергією міжатомного зв'язку C–F. Додатково до повільного біологічного розкладання такі сполуки характеризуються доволі високою гострою токсичністю і здатністю накопичуватися в тканинах живих організмів. Так, наприклад, у роботі [18] підвищений вміст

відповідних речовин у сироватці крові виявлено в працівників пожежно-рятувальних підрозділів, які тривалий час гасили пожежі із застосуванням плівкоутворювальних піноутворювачів. Автори [19] досліджували вплив окремих плівкоутворювальних піноутворювачів на ріпчасту цибулю. В результаті досліджень було виявлено цито- та генотоксичні впливи, а також збільшення кількості хромосомних аберацій.

У роботі [20] проводили дослідження задля оцінювання токсикологічного впливу фторсинтетичних плівкоутворювальних піноутворювачів на рибу породи *поеліція сімчаста*, виявлення пошкоджень молекул ДНК у їхніх клітинах, а також оцінювання ступеня пероксидного окислення ліпідів в організмах риби. Авторами було виявлено, що токсичність піноутворювачів різних марок значною мірою відрізняється, проте в усіх випадках переважаючим чинником є гострий токсикологічний вплив, що призводить до пошкодження клітинних мембран, тоді як решта ефектів майже відсутня. Незважаючи на суттєву різницю в токсичності, усі досліджені піноутворювачі охарактеризовано як такі, що спричиняють загибель риби в концентраціях, значно нижчих за ті, що рекомендовані виробниками до застосування під час гасіння пожеж. Характерно, що поштовхом для цієї роботи стала пожежа в порту Сантос (Бразилія), внаслідок якої та гасіння якої сталося значне забруднення акваторії горючими речовинами та плівкоутворювальними піноутворювачами, що супроводжувалося масовим мором риби.

Крім експериментальних досліджень, автори [20] проаналізували відповідну літературу і з'ясували, що станом на 2017 рік серед складників плівкоутворювальних піноутворювачів були відомі 57 фторвмісних речовин, 40 з яких повільно розкладаються у природних умовах. Більше того, в результаті руйнування таких речовин в об'єктах довкілля утворюється понад 100 вторинних небезпечних хімічних сполук. Автори роботи дійшли висновку, що фторсинтетичні піноутворювачі загалом можуть завдавати суттєвої шкоди об'єктам довкілля, особливо у разі надходження в гірля річок і морські середовища.

Водночас роботу [21], в якій як піддослідну рослину використовували ріпу городню, присвячено оцінюванню токсичності замінників піноутворювачів типу AFFF. Актуальність досліджень вмотивовано фактичною відсутністю даних щодо шкідливого впливу піноутворювачів типу F3 на живі організми і довкілля загалом. Для досліджень використано 6 зразків речовин, що не містять атомів фтору, та 1 зразок речовини, що містить їх. З'ясувалося, що п'ять з шести таких

речовин виявилися більш токсичними для рослин, ніж використана для досліджень фторвмісна речовина, а їхній шкідливий вплив відображався як на вегетації, так і на розмноженні ріпи городньої. У повній кореляції з більш високою токсичністю в надземних тканинах рослин було виявлено більшу кількість метаболітів п'яти більш токсичних речовин, ніж у разі двох безпечніших препаратів.

Серед найважливіших результатів, одержаних дослідниками у зазначеній роботі, варто згадати окремі відомості, виявлені ними в результаті літературного пошуку. Зокрема, наведено дані, які свідчать про нижчу за інших однакових умов токсичність перфторованих речовин з більш коротким вуглецевим ланцюгом, проте стійкість таких сполук у природних умовах залишається такою самою високою. Також автори зазначають практичну відсутність даних щодо токсичності піноутворювачів типу F3 як замінників AFFF.

Отже, відсутність фторвмісних сполук у піноутворювачі загалом не є свідченням його нижчої токсичності і меншої небезпечності для довкілля. Автори іншої роботи [22] зазначають, що як поверхнево-активна основа піноутворювачів типу F3 можуть використовуватися кремнійорганічні ПАР, які також є такими, що не зустрічаються в природі, хімічними речовинами. Вони також можуть бути токсичними та/або біологічно «жорсткими» (тобто такими, які повільно розкладаються під впливом мікрофлори водойм і ґрунтів).

Цінну інформацію щодо розкладання фторорганічних сполук у природних умовах наведено в роботі [23]. Об'єктом досліджень була та сама хімічна речовина, яку розглядали у статті [17]. Автори систематизували результати проведених раніше досліджень з оцінювання швидкості її руйнування чистими і такими, якими населено активний мул, біологічних очисних споруд, бактеріальними культурами, мікрофлорою річкових відкладів, мулу заболочених місць, фільтрату сміттєзвалищ, а також ґрунтів. З'ясувалося, що швидкість руйнування шкідливої речовини в різних середовищах різко відрізняється. Так, наприклад, період до розкладання половини її кількості становив 5 діб для річкових донних відкладів, 86 діб у фільтраті сміттєзвалищ і 2 роки в активному мулі біологічних очисних споруд. Використана у згаданих дослідженнях чиста бактеріальна культура забезпечила розкладання понад 99 % фторвмісної речовини упродовж лише 7 діб за наявності обмеженої кількості сполук сірки, тоді як за наявності сульфатів біологічне розкладання цієї речовини не відбувалося взагалі. Виявлені авторами факти дали змогу дійти висновку, що

декларована виробниками безпечність тих чи інших препаратів для довкілля насправді може бути не цілком коректною, оскільки вона визначається умовами їх перебування в природних екосистемах. На вкрай низьку швидкість розкладання фторвмісних органічних речовин у біологічних очисних спорудах вказують також автори публікації [24], які з'ясували це в результаті аналітичних досліджень.

Автори [25] вивчали процеси біологічного розкладання низки фторвмісних сполук, а також піноутворювачів, які містять такі сполуки, у стічних водах, застосовуючи для цього ті самі методи, якими оцінюють здатність звичайних синтетичних ПАР до біологічного розкладання. З'ясувалося, що за таких умов усі три досліджені зразки піноутворювачів відповідають установленим методикою критеріям віднесення до біологічно «м'яких» речовин, оскільки ступінь їх розкладання у 28-добовому циклі дослідження становив від 77 % до 96 %. Натомість зазначено, що обсяги утворення в результаті перебігу цих процесів органічних речовин, що не містять атомів фтору, набагато нижчі за очікувані, тобто хімічні зв'язки C–F руйнуються не повністю і багато метаболітів фторвмісних ПАР однаково залишаються фторвмісними органічними речовинами.

Доволі висока токсичність і відносно низька здатність до біологічного розкладання численних фторорганічних сполук, у тому числі складників плівкоутворювальних піноутворювачів, не могли не стимулювати спроб штучного прискорення їх руйнування. Так, наприклад, у роботі [26] досліджували можливість зниження концентрації двох широко використовуваних фторвмісних сполук, а також одного зразка плівкоутворювального піноутворювача в піску, забрудненому ними, подрібненням цього піску в кульковому млині, в тому числі з попереднім додаванням до піску калію гідроксиду (KOH). Такими сполуками були перфтороктанова (PFOA) і перфтороктансульфонові (PFOS) кислоти, які, за даними авторів, найчастіше зустрічаються в рецептурах плівкоутворювальних піноутворювачів для гасіння пожеж. З'ясовано, що додавання цієї речовини сприяє перебігу процесу, але навіть без неї оброблення в кульковому млині дає змогу зруйнувати до 98–99 % забруднювачів. З'ясовано, що наявність води знижує глибину перетворення, а сам факт руйнування фторорганічних сполук пояснено їхньою взаємодією з хімічно активними частинками, що утворюються під час подрібнення піску в кульковому млині.

У статті [27] викладено результати досліджень процесів руйнування речовин, що утворюються

під час розкладання піноутворювачів на основі двох щойно названих перфторованих кислот, а також інших фторвмісних сполук, використовуваних у промисловості, під час піролізу. В результаті їх проведення з'ясовано, що вже за відносно невисоких температур формується близько 30 сполук, що не містять атомів фтору (двоатомні спирти, прості ефіри тощо). В умовах піролізу за більш високих температур виявлено утворення гетероциклічних сполук з атомами кисню та азоту. Загалом з'ясовано, що найменша кількість подібних шкідливих речовин утворюється за температури +890 °C, яка відповідала верхній межі діапазону, в якому проводили дослідження.

Автори [28] для вилучення PFAS із забруднених ними ґрунтів запропонували використовувати намагнічене активоване вугілля. Проводити його намагнічування запропонували задля вилучення з обробленого ґрунту найбільш активованого вугілля після його насичення фторорганічними сполуками, оскільки вони після зв'язування адсорбентом можуть зберігати здатність до відновлення рухливості з поверненням у субстрат, з якого їх було видалено сорбцією в умовах тривалого перебування активованого вугілля в ґрунті. Установлено, що такий процес дає змогу знизити концентрацію забруднювачів на більш ніж 80 % за умови, що вміст води в ґрунті не перевищує 7 % за масою. Знешкодження ж речовин, адсорбованих активованим вугіллям, після його магнітної сепарації запропоновано здійснювати гідротермічним обробленням.

Доволі оригінальний спосіб очищення ґрунтів від забруднення PFAS, а також фторсинтетичними плівкоутворювальними піноутворювачами запропонували автори [29]. Він полягає в нагріванні забрудненого ґрунту високочастотним випромінюванням і являє собою, за їхніми твердженнями, нову енергоефективну технологію видалення забруднювачів, яка дає змогу швидко й ефективно вилучати фтормісні речовини з ґрунту незалежно від типів як самого цього ґрунту, так і забруднювача. Зазначено швидке і практично повне (понад 99,9 %) розкладання PFAS з коротким і довгим вуглецевим ланцюгом, речовин, використовуваних для синтезу цих сполук, та інших речовин упродовж 1–2 хвилин перебігу процесу. Більше того, концентрація забруднювачів у ґрунті, а також тип самого ґрунту майже не впливала на повноту перетворення. Проміжних продуктів розкладання фторорганічних сполук в обробленому ґрунті розробники методу не виявили, а ризики надходження первинних фторованих сполук в атмосферу через швидкий перебіг процесу також оцінено як мінімальні.

У тій самій роботі також наведено короткий огляд відомих методів очищення ґрунтів від органічних сполук, і зазначено, що не всі вони придатні для вилучення з ґрунтів саме фторвмісних речовин. Зазначено, що такий метод, як зняття шару забрудненого ґрунту з його вивозом на звалище хімічних відходів, хоча й дає змогу здійснити рекультивацію забруднених ділянок, однаково не забезпечує руйнування забруднювачів, а передбачає лише їх переміщення. До того ж подібні операції пов'язані як з великими витратами, так і з небезпекою втрати частини забрудненого ґрунту під час його транспортування. Альтернативою вивезенню ґрунту може бути його промивання водою, проте у разі забрудненості ПАР воно може бути малоефективним через їх адсорбцію на твердих частинках ґрунтів. Водночас промивання ґрунту водою, яке також пов'язане з високими витратами коштів та часу, призводить до утворення рідких відходів і, природно, не забезпечує руйнування самих забруднювачів. Нарешті, ефективність процесу додатково залежить від типу ґрунту і ступеня його забрудненості, що вкрай ускладнює розроблення технологічних регламентів оброблення забруднених ґрунтів, які б насправді забезпечили його високу ефективність і стабільність одержуваних результатів.

Як спосіб часткового звільнення забруднених ґрунтів від фторвмісних та інших органічних сполук у роботі [29] назване їх зв'язування активним вугіллям або іншими матеріалами, що можуть відігравати роль адсорбентів (про це вже йшлося вище). Проте подібні технології забезпечують лише зв'язування забруднювачів, а не їх видалення, до того ж не виключають можливого повторного надходження забруднювачів у ґрунти. Сам адсорбент може потребувати регулярної заміни, що також створює додаткові труднощі, а повнота вилучення речовини залежить від численних чинників і не є стабільною.

Технології, що передбачають окислення, як-от окислення водою в надкритичному стані, електрохімічне окислення або фотокаталітичне видалення забруднень, можуть забезпечувати руйнування PFAS за достатнього рівня вологості ґрунтів, проте неефективні в умовах дефіциту води, до того ж можуть потребувати суворого дотримання умов проведення технологічних процесів.

Біологічні методи оброблення забруднених ґрунтів задля видалення фторорганічних ПАР автори [29], спираючись на літературні дані, називають обмежено придатними через високу хімічну стійкість таких сполук, а також вибіркову придатність тих чи інших культур мікроорганізмів до їх розкладання. Крім того, біологічне розкладання

таких ПАР може супроводжуватися утворенням розмаїття інших небезпечних хімічних речовин, впоратися з видаленням яких може бути ще складніше. Рекультивацію ґрунтів вирощуванням певних рослин названо потенційно перспективною технологією, проте вказано на обмежену придатність цього підходу у великих масштабах.

Саме нездоланні недоліки усіх вищезгаданих процесів привели авторів до висновку про необхідність швидкого нагрівання забрудненого фторвмісними сполуками ґрунту задля швидкого і повного їх руйнування з мінімальними обсягами утворення вторинних небезпечних хімічних речовин, для чого й було застосовано технологію високочастотного нагрівання забруднених ґрунтів.

У роботі [30] досліджували процеси вилучення PFAS з водних розчинів, що містили фторсинтетичні плівкоутворювальні піноутворювачі, пропусканням таких розчинів крізь спеціальні мембрани під тиском, реалізуючи процеси нанофільтрації та зворотного осмосу. В результаті виконання робіт, під час яких використовували 42 сполуки, досягнуто ступінь їх вилучення з водних розчинів понад 97 %. Вибір на користь таких технологій було зроблено у зв'язку з тим, що проведений дослідниками аналіз літературних даних показав низьку ефективність більшості інших відомих способів вилучення забруднень з води.

Набагато простіший підхід запропоновано у статті [31]: видалення ПАР із забрудненої води запропоновано здійснювати пропусканням через неї повітря, в результаті чого відбувається спінування (отже, збагачення поверхневого шару на молекули фторвмісних ПАР) з одночасним видаленням піни, що утворюється. За даними авторів, з води в такий спосіб вдавалося вилучити близько 96 % PFOS, якою цю воду було забруднено.

Автори [32] описують запропонований ними спосіб вилучення PFOA з води електрокоагуляцією з використанням електрода, на який нанесено губчасте залізо. Для інтенсифікації процесу до забрудненої води додавали персульфат натрію, а також додатково обробляли її ультрафіолетовим випромінюванням. Згідно з поданою інформацією, упродовж 60 хв оброблення концентрація фторвмісної сполуки знизилася на 87,5 %, причому 54,6 % від її кількості перетворилися на речовини, що не містять атомів фтору.

У роботі [33] запропоновано обробляти воду, забруднену PFAS, у реакторі в умовах нагрівання за наявності луку. Дослідникам вдалося домогтися руйнування численних сполук цього класу з різною довжиною вуглецевого ланцюга з утворенням сполук, що не містять атомів фтору.

Відзначено високий ступінь вилучення забруднювачів з оброблюваної води.

Висновки. Результати проведених аналітичних досліджень дають підстави сформулювати такі висновки.

1) Найефективнішим сучасним засобом гасіння неполярних горючих рідин є піна низької кратності, генерована з робочих розчинів плівкоутворювальних піноутворювачів, що може подаватися «поверхневим», а іноді – також «підшаровим» та/або «напівпідшаровим» способом. Гіпотетичне припинення виробництва фторвмісних речовин, використовуваних в їх рецептурах, призведе до неможливості реалізації «підшарового» способу.

2) Фторвмісні поверхнево-активні речовини, використовувані у виробництві піноутворювачів, значною мірою відрізняються між собою за показниками токсичності і здатності до біологічного розкладання. На швидкість їх руйнування в природних екосистемах і на очисних спорудах, а також на якісний і кількісний склад метаболітів можуть впливати наявні культури мікрофлори і забрудненість середовищ іншими речовинами.

3) Сьогодні наявно обмаль даних щодо здатності різноманітних фторорганічних речовин до біологічного розкладання. Водночас зрозуміло, що гомологи з меншою довжиною вуглецевого ланцюга загалом менш шкідливі. Серед них чимало відносно безпечних сполук, придатних до використання в рецептурах піноутворювачів.

4) Наявні дані не дають підстав стверджувати, що наявні піноутворювачі типу F3, які вважають заміниками плівкоутворювальних піноутворювачів, безпечніші за них з точки зору впливу на довкілля. Зокрема, кремнійорганічні сполуки можуть бути більш токсичними, ніж фторвмісні, і біологічно «жорсткими» через своє неприродне походження.

5) Відомі методи очищення стічних і промивних вод, а також ґрунтів від забруднень можуть не бути достатньо ефективними під час видалення з них фторвмісних поверхнево-активних речовин. Водночас підтверджено можливість їх ефективного видалення з води низкою методів. Найбезпечнішим методом знешкодження таких сполук є їх високотемпературне спалювання в печах, призначених для знешкодження токсичних відходів.

6) Для мінімізації впливу на довкілля фторвмісних складників піноутворювачів необхідно першочергово вживати заходів щодо недопущення їх розливання в процесі виробництва, транспортування та зберігання, а також мінімізації надходження таких речовин в довкілля під час гасіння пожеж. Методи оброблення забруднених ділянок

слід вибирати залежно від хімічного складу піноутворювача й обставин, що наявні в конкретному випадку.

7) Для обґрунтування і забезпечення можливості подальшого використання плівкоутворювальних піноутворювачів необхідні всебічні дослідження, спрямовані на вдосконалення методів їх знешкодження, а також пошук заміників хімічних речовин, використовуваних у рецептурах. Це дасть змогу зберегти ефективність засобів пінного пожежогасіння з одночасним виконанням вимог Стокгольмської конвенції про стійкі органічні забруднювачі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Боровиков В. О. Одержання та застосування екологічно безпечних піноутворювачів для гасіння пожеж: дис. ... канд. техн. наук. Київ: УкрНДІПБ МВС України, 2002. 237 с.

2. ДСТУ EN 1568:2018 (усі частини) Вогнегасні речовини. Піноутворювачі [чинний від 2019-01] (Інформація та документація).

3. ДСТУ 8615:2016 Пожежна безпека. Піноутворювачі для гасіння пожеж. Настанови щодо поводження з вогнегасними речовинами, використовуваними у стаціонарних системах пінного пожежогасіння [чинний від 2017-07] (Інформація та документація).

4. ДСТУ 9215:2023 Вогнегасні речовини. Піноутворювачі. Настанови щодо використання, зберігання, утилізування та випробування [чинний від 2023-11] (Інформація та документація).

5. Стокгольмська конвенція про стійкі органічні забруднювачі. URL: <https://www.pops.int/TheConvention/Overview/TextoftheConvention/tabid/2232/Default.aspx> (дата звернення 22.12.2024).

6. Інструкція про порядок застосування і випробування піноутворювачів для пожежогасіння, затверджена наказом МНС України від 24 листопада 2008 року № 851 [чинна від 2008-11-24] (Інформація та документація).

7. Слуцька О. М. Удосконалення системи оцінювання якості піноутворювачів для гасіння пожеж: дис. ... канд. техн. наук. Львів : ЛДУБЖД ДСНС України, 2019. 212 с.

8. Ковалишин В. В., Васильєва О. Е., Козяр Н. М. Пінне гасіння: навчальний посібник Львів : Сполом, 2007. 168 с.

9. ДСТУ EN 13565-2:2022 (EN 13565-2:2018+AC:2019, IDT) Стаціонарні системи пожежогасіння. Пінні системи. Ч. 2: Проектування, будівництво та обслуговування [чинний від 2024-01] (Інформація та документація).

10. NFPA 11 (2024 edition) Standard for low-, medium and high-expansion foam [чинний від 2024-01] (Інформація та документація).

11. Войтович Т. М. Вдосконалення технології «підшарового» пожежогасіння в резервуарах з

нафтопродуктами: дис. ... докт. філософії. Львів : ЛДУБЖД ДСНС України, 2020. 216 с.

12. ДСТУ ГОСТ 30333:2009 Паспорт безпечності хімічної продукції. Загальні вимоги (ДСТУ 30333-2007, IDT).

13. Mattias Sörengård, Sofia Bergström, Philip MCleaf, Korin Wiberg, Lutz Ahrens (2022). Long-distance transport of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in a Swedish drinking water aquifer (2022). *Environmental Pollution*. 2022. Volume 311. 119981. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119981>

14. Jennifer Bräunig, Christine Baduel, Amy Heffernan, Anna Rotander, Eric Donaldson, Jochen F. Mueller (2017). Fate and redistribution of perfluoroalkyl acids through AFFF-impacted groundwater. *Science of the Total Environment*. 2017. Volume 596–597. P. 360–68. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.095>

15. Åse Høisæter, Anja Pfaff, Gijs D. Breedveld (2019). Leaching and transport of PFAS from aqueous film-forming foam (AFFF) in the unsaturated soil at a firefighting training facility under cold climatic conditions. *Journal of Contaminant Hydrology*. 2019. Volume 222. P. 112–122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2019.02.010>

16. Johnsie R. Lang, Jeffery McDonough, T. C. Guillette, Peter Storch, John Anderson, David Liles, Robert Prigge, Jonathan A. L. Miles, Craig Divine (2022). Characterization of per- and polyfluoroalkyl substances on fire suppression system piping and optimization of removal methods. *Chemosphere*. Volume 308. Part 2. December 2022. 136254. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136254>

17. Sheng Dong, Peng-Fei Yan, Chen Liu, Katherine E. Manz, Melissa P. Mezzari, Linda M. Abriola, Kurt D. Pennell, Natalie L. Cápiro (2023). Assessing aerobic biotransformation of 8:2 fluorotelomer alcohol in aqueous film-forming foam (AFFF)-impacted soils: Pathways and microbial community dynamics. *Journal of Hazardous Materials*. 2023. Volume 446. 130629. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130629>

18. Anna Rotander, Leisa-Maree L. Toms, Lesa Aylward, Margaret Kay, Jochen F. Mueller (2015). Elevated levels of PFOS and PFHxS in firefighter sex exposed to aqueous film forming foam (AFFF). *Environment International*. 2015. Volume 82. P. 28–34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.05.005>

19. Panneerselvam Logeshwaran, Anithadevi Kenday Sivaram, Mallavarapu Megharaj, Ravi Naidu (2016). Evaluation of cyto- and genotoxic effects of Class B firefighting foam products: Tridol-S 3 % AFFF and Tridol-S 6 % AFFF to *Allium cepa*. *Environmental Technology & Innovation*. 2016. Volume 6. P. 185–194. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2016.10.003>

20. Maysa Ueda de Carvalho, Lucas Buruaem Moreira, Denis Moledo de Souza Abessa (2023). Are fire suppressants “nontoxic”? Acute toxicity, DNA damage and lipid peroxidation in fish (*Poecili areticulata*) exposed to low concentrations. *Journal of Hazardous*

Materials Advances. 2023. Volume 9. 100238. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2023.100238>

21. Xiaoqin Wu, Helen Nguyen, Damian Kim, Hui Peng (2022). Chronic toxicity of PFAS-free AFFF alternatives interrestrial plant *Brassica rapa*. *Science of the Total Environment*. 2022. Volume 850. 158100. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158100>

22. Brian D. Etz, Maleigh Mifkovic, Shubham Vyas, Manoj K. Shukla (2022). High-temperature decomposition chemistry of trimethylsiloxane surfactants, a potential Fluorine-Free replacement for fire suppression. *Chemosphere*. 2022. Volume 308. Part 2. 136351. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136351>

23. Peng-Fei Yan, Sheng Dong, Katherine E. Manz, Matthew J. Woodcock, Chen Liu, Melissa P. Mezzari, Linda M. Abriola, Kurt D. Pennell, Natalie L. Cápiro (2024). Aerobic biotransformation of 6:2 fluorotelomer sulfonate in soils from two aqueous film-forming foam (AFFF)-impacted sites. *Water Research*. 2024. Volume 249. 120941. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120941>

24. Donovan S. Vitale, Donald M. Reeves, Ethan S. Coffin, Garrett W. Link, Daniel P. Cassidy, Steven M. Rochow (2023). Long-duration monitoring and mass balance of PFAS at a wastewater treatment plant following the release of aqueous film-forming foam concentrate. *Water Research*. 2023. Volume 242. 120268. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120268>

25. A. Bourgeois, J. Bergendahl, A. Rangwala (2015). Biodegradability of fluorinated fire-fighting foams in water. *Chemosphere*. 2015. Volume 131. P. 104–109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.02.042>

26. Lauren P. Turner, Bernard H. Kueper, Kevin M. Jaansalu, David J. Patch, Nick Battye, Omneya El-Sharnouby, Kevin G. Mumford, Kela P. Weber (2021). Mechanochemical remediation of perfluorooctanesulfonic acid (PFOS) and perfluorooctanoic acid (PFOA) amended sand and aqueous film-forming foam (AFFF) impacted soil by planetary ball milling. *Science of the Total Environment*. 2021. Volume 765. 142722. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142722>

27. Bin Yao, Runze Sun, Ali Alinezhad, Alena Kubátová, Matt F. Simcik, Xiaohong Guan, Feng Xiao (2022). The first quantitative investigation of compounds generated from PFAS, PFAS-containing aqueous film-forming foams and commercial fluorosurfactants in pyrolytic processes. *Journal of Hazardous Materials*. 2022. Volume 436. 129313. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129313>

28. Chih-Hsuan Shih, Jinha Kim, Shih-Hung Yang, Ori Soker, Timothy J. Strathmann, Kung-Hui Chu (2024). Remediation of PFAS-impacted soils using magnetic activated carbon (MAC) and hydrothermal alkaline treatment (HALT). *Science of the Total Environment*. 2024. Volume 912. 168931. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168931>

29. Runze Sun, Samuel Babalol, Ruichong Ni, Alireza Arhami Dolatabad, Jiefei Cao, Feng Xiao (2024). Efficient and fast remediation of soil contaminated by per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) by high-frequency heating. *Journal of Hazardous Materials*. 2024. Volume 463. 132660. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132660>

30. Charlie J. Liu, Timothy J. Strathmann, Christopher Bellona (2021). Rejection of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in aqueous film-forming foam by high-pressure membranes. *Water Research*. 2021. Volume 188. 116546. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116546>

31. Pingping Meng, Shubo Deng, Ayiguli Maimaiti, Bin Wang, Jun Huang, Yujue Wang, Ian T. Cousins, Gang Yu (2018). Efficient removal of perfluorooctane sulfonate from aqueous film-forming foam solution by aeration-foam collection. *Chemosphere*. 2018. Volume 203. P. 263–270. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.183>

32. Dan Zhang, Yiming Li, Limei Dong, Xiuping Chen, Yihao Guan, Wei Liu, Zhining Wang (2022). Efficient degradation of PFOA in water by persulfate-assisted and UV-activated electrocoagulation technique using Fe foam electrode. *Electrochimica Acta*. 2022. Volume 434. 141296. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2022.141296>

33. Brian R. Pinkard, Conrad Austin, Anmol L. Purohit, Jianna Li, Igor V. Novosselov (2023). Destruction of PFAS in AFFF-impacted fire training pit water, with a continuous hydrothermal alkaline treatment reactor. *Chemosphere*. 2023. Volume 314. 137681. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137681>

REFERENCES

1. Borovykov, V. O. (2002). Odezhannia ta zastosuvannia ekolohichno bezpechnykh pinoutvoriuvachiv dlia hasinnia pozhezh: dis. ... kand. tekhn. nauk [Obtaining and use of environmentally safe foaming agents for fire extinguishing: PhD thesis]. Kyiv, UkrNDIPB MVS Ukrainy. 237 s. [in Ukrainian].

2. DSTU EN 1568:2018 (usi chastyny). Vohnehasni rehovyny. Pinoutvoriuvachi [Fire extinguishing agents. Foaming agents] [Effective from 2019-01]. (Informatsiia ta dokumentatsiia – Information and documentation). [in Ukrainian].

3. DSTU 8615:2016. Pozhezhna bezpeka. Pinoutvoriuvachi dlia hasinnia pozhezh. Nastanovy shchodo povodzhennia z vohnehasnymy rehovynamy, vykorystovuvany u statsionarnykh systemakh pinnoho pozhezhohasinnia [Fire safety. Foaming agents for fire extinguishing. Guidelines for handling extinguishing agents used in stationary foam fire suppression systems] [Effective from 2017-07]. (Informatsiia ta dokumentatsiia – Information and documentation). [in Ukrainian].

4. DSTU 9215:2023. Vohnehasni rehovyny. Pinoutvoriuvachi. Nastanovy shchodo vykorystannia, zberihannia, utylizuvannia ta vyprovuvannia [Fire extinguishing agents. Foaming agents. Guidelines for use, storage, disposal, and testing] [Effective from 2023-11]. (Informatsiia ta dokumentatsiia – Information and documentation). [in Ukrainian].

5. Stokholmska konventsiiia pro stiiki orhanichni zabrudniuvachi [Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants]. Retrieved December 22, 2024, from <https://www.pops.int/TheConvention/Overview/TextoftheConvention/tabid/2232/Default.aspx> [in Ukrainian].

6. Instruksiiia pro poriadok zastosuvannia i vyprovuvannia pinoutvoriuvachiv dlia pozhezhohasinnia, zatverdzhena nakazom MNS Ukrainy vid 24.11.2008 № 851 [Instruction on the procedure for the use and testing of foaming agents for fire extinguishing, approved by the order of the Ministry of Emergency Situations of Ukraine dated 24.11.2008 No. 851] [Effective from 2008-11-24]. (Informatsiia ta dokumentatsiia – Information and documentation). [in Ukrainian].

7. Slutska, O. M. (2019). Udoshkonalennia systemy otsiniuvannia yakosti pinoutvoriuvachiv dlia hasinnia pozhezh: Dys. ... kand. tekhn. nauk [Improvement of the quality assessment system of foaming agents for fire extinguishing: PhD thesis]. Lviv, LDUBZhD DSNS Ukrainy. 212 s. [in Ukrainian].

8. Kovalishyn, V. V., Vasyliieva, O. E., & Koziar, N. M. (2007). Pinne hasinnia [Foam extinguishing]. Navch. posibnyk – Lviv, Spolom. 168 s. [in Ukrainian].

9. DSTU EN 13565-2:2022 (EN 13565-2:2018+AC:2019, IDT). Statsionarni systemy pozhezhohasinnia. Pinni systemy. Chastyna 2. Proiektuvannia, budivnytstvo ta obsluhovuvannia [Fixed firefighting systems. Foam systems. Part 2. Design, construction, and maintenance] [Effective from 2024-01]. (Informatsiia ta dokumentatsiia – Information and documentation). [in Ukrainian].

10. National Fire Protection Association (NFPA). (2024). *NFPA 11: Standard for low-, medium-, and high-expansion foam* [Effective from 2024-01]. [in English].

11. Voitovych, T. M. (2020). Vdoskonalennia tekhnolohii “pidsharovoho” pozhezhohasinnia v rezervuarakh z naftoproduktamy: Dys. ... doktora filosofii [Improvement of the “sub-layer” fire extinguishing technology in oil product tanks: PhD thesis]. Lviv, LDUBZhD DSNS Ukrainy. 216 s. [in Ukrainian].

12. DSTU GOST 30333:2009. (2009). Pasport bezpechnosti khimichnoi produktsii. Zahalni vymohy (GOST 30333-2007, IDT) [Safety data sheet for chemical products. General requirements] – Informatsiia ta dokumentatsiia – Information and documentation. [in Ukrainian].

13. Sörengård, M., Bergström, S., McCleaf, P., Wiberg, K., & Ahrens, L. (2022). Long-distance

- transport of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in a Swedish drinking water aquifer. *Environmental Pollution*, 311, 119981. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119981>
14. Bräunig, J., Baduel, C., Heffernan, A., Rotander, A., Donaldson, E., & Mueller, J. F. (2017). Fate and redistribution of perfluoroalkyl acids through AFFF-impacted groundwater. *Science of the Total Environment*, 596–597, 360–368. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.095>
 15. Høisæter, Å., Pfaff, A., & Breedveld, G. D. (2019). Leaching and transport of PFAS from aqueous film-forming foam (AFFF) in the unsaturated soil at a firefighting training facility under cold climatic conditions. *Journal of Contaminant Hydrology*, 222, 112–122. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2019.02.010>
 16. Lang, J. R., McDonough, J., Guillette, T. C., Storch, P., Anderson, J., Liles, D., Prigge, R., Miles, J. A. L., & Divine, C. (2022). Characterization of per- and polyfluoroalkyl substances on fire suppression system piping and optimization of removal methods. *Chemosphere*, 308 (Part 2), 136254. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136254>
 17. Dong, S., Yan, P.-F., Liu, C., Manz, K. E., Mezzari, M. P., Abriola, L. M., Pennell, K. D., & Cápiro, N. L. (2023). Assessing aerobic biotransformation of 8:2 fluorotelomer alcohol in aqueous film-forming foam (AFFF)-impacted soils: Pathways and microbial community dynamics. *Journal of Hazardous Materials*, 446, 130629. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130629>
 18. Rotander, A., Toms, L.-M. L., Aylward, L., Kay, M., & Mueller, J. F. (2015). Elevated levels of PFOS and PFHxS in firefighters exposed to aqueous film forming foam (AFFF). *Environment International*, 82, 28–34. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.05.005>
 19. Logeshwaran, P., Sivaram, A. K., Megharaj, M., & Naidu, R. (2016). Evaluation of cyto- and genotoxic effects of Class B firefighting foam products: Tridol-S 3 % AFFF and Tridol-S 6 % AFFF to *Allium cepa*. *Environmental Technology & Innovation*, 6, 185–194. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2016.10.003>
 20. de Carvalho, M. U., Moreira, L. B., & de Souza Abessa, D. M. (2023). Are fire suppressants “nontoxic”? Acute toxicity, DNA damage and lipid peroxidation in fish (*Poecilia reticulata*) exposed to low concentrations. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 9, 100238. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2023.100238>
 21. Wu, X., Nguyen, H., Kim, D., & Peng, H. (2022). Chronic toxicity of PFAS-free AFFF alternatives in terrestrial plant *Brassica rapa*. , 158100. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158100>
 22. Etz, B. D., Mifkovic, M., Vyas, S., & Shukla, M. K. (2022). High-temperature decomposition chemistry of trimethylsiloxane surfactants, a potential fluorine-free replacement for fire suppression. *Chemosphere*, 308 (Part 2), 136351. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136351>
 23. Yan, P.-F., Dong, S., Manz, K. E., Woodcock, M. J., Liu, C., Mezzari, M. P., Abriola, L. M., Pennell, K. D., & Cápiro, N. L. (2024). Aerobic biotransformation of 6:2 fluorotelomer sulfonate in soils from two aqueous film-forming foam (AFFF)-impacted sites. *Water Research*, 249, 120941. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120941>
 24. Vitale, D. S., Reeves, D. M., Coffin, E. S., Link, G. W., Cassidy, D. P., & Rochow, S. M. (2023). Long-duration monitoring and mass balance of PFAS at a wastewater treatment plant following the release of aqueous film-forming foam concentrate. *Water Research*, 242, 120268. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120268>
 25. Bourgeois, A., Bergendahl, J., & Rangwala, A. (2015). Biodegradability of fluorinated fire-fighting foams in water. *Chemosphere*, 131, 104–109. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.02.042>
 26. Turner, L. P., Kueper, B. H., Jaansalu, K. M., Patch, D. J., Battye, N., El-Sharnouby, O., Mumford, K. G., & Weber, K. P. (2021). Mechanochemical remediation of perfluorooctanesulfonic acid (PFOS) and perfluorooctanoic acid (PFOA) amended sand and aqueous film-forming foam (AFFF) impacted soil by planetary ball milling. *Science of the Total Environment*, 765, 142722. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142722>
 27. Yao, B., Sun, R., Alinezhad, A., Kubátová, A., Simeik, M. F., Guan, X., & Xiao, F. (2022). The first quantitative investigation of compounds generated from PFAS, PFAS-containing aqueous film-forming foams and commercial fluorosurfactants in pyrolytic processes. *Journal of Hazardous Materials*, 436, 129313. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129313>
 28. Shih, C.-H., Kim, J., Yang, S.-H., Soker, O., Strathmann, T. J., & Chu, K.-H. (2024). Remediation of PFAS-impacted soils using magnetic activated carbon (MAC) and hydrothermal alkaline treatment (HALT). *Science of the Total Environment*, 912, 168931. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168931>
 29. Sun, R., Babalol, S., Ni, R., Arhami Dolatabad, A., Cao, J., & Xiao, F. (2024). Efficient and fast remediation of soil contaminated by per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) by high-frequency heating. *Journal of Hazardous Materials*, 463, 132660. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132660>
 30. Liu, C. J., Strathmann, T. J., & Bellona, C. (2021). Rejection of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in aqueous film-forming foam by high-pressure membranes. *Water Research*, 188, 116546. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116546>
 31. Meng, P., Deng, S., Maimaiti, A., Wang, B., Huang, J., Wang, Y., Cousins, I. T., & Yu, G. (2018). Efficient removal of perfluorooctane sulfonate from aqueous film-forming foam solution by aeration-foam collection. *Chemosphere*, 203, 263–270. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.183>

32. Zhang, D., Li, Y., Dong, L., Chen, X., Guan, Y., Liu, W., & Wang, Z. (2022). Efficient degradation of PFOA in water by persulfate-assisted and UV-activated electrocoagulation technique using Fe foam electrode. *Electrochimica Acta*, 434, 141296. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2022.141296>

33. Pinkard, B. R., Austin, C., Purohit, A. L., Li, J., & Novosselov, I. V. (2023). Destruction of PFAS in AFFF-impacted fire training pit water, with a continuous hydrothermal alkaline treatment reactor. *Chemosphere*, 314, 137681. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137681>

© В. О. Боровиков, О. М. Слуцька, Р. Ю. Сукач, Д. П. Войтович, 2025.

Оглядова стаття.

Надійшла до редакції 30.04.2025.

Прийнято до публікації 04.06.2025.



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.46.2025.02>

Р. Б. Веселівський, Д. В. Смоляк, І. М. Поліщук, А. А. Петренко
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
м. Львів, Україна

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

<https://orcid.org/0000-0002-5458-326X> – Д. В. Смоляк

<https://orcid.org/0009-0004-5221-8885> – І. М. Поліщук

<https://orcid.org/0009-0008-2403-6338> – А. А. Петренко

✉ roman_veselivskuy@yahoo.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СПОСОБІВ ЗАКРІПЛЕННЯ РЯТУВАЛЬНОЇ МОТУЗКИ ЗА КОНСТРУКЦІЮ

Постановка проблеми. Одним з елементів підготовки пожежно-рятувальних підрозділів є навчальні вправи з рятувальною мотузкою. Мотузка пожежна рятувальна призначена для використання під час проведення рятувальних робіт на висоті, саморятування пожежника, роботи в обмеженому просторі, організації страхування під час роботи в безпорному просторі та проведення інших аварійно-рятувальних робіт на висоті. Для ефективного застосування мотузки пожежної рятувальної у кожному із зазначених випадків необхідне її швидке та надійне закріплення за конструкцію (опору). Особовий склад пожежно-рятувальних підрозділів використовує чотири способи закріплення рятувальної мотузки за конструкцію, які регламентовані законодавством. Вони є ефективними, простими у в'язанні та доволі надійними. Проте нормативний час навчальної вправи «закріплення рятувальної мотузки за конструкцію», що максимально складає 5 с, є складним, а поспіх виконання призводить до неправильного в'язання та ненадійності вузла. Також слід зауважити, що на правильність та швидкість виконання цієї вправи будуть впливати рівень підготовки особового складу та температура довкілля (зимовий/літній період).

Враховуючи важливість правильного та надійного закріплення мотузки за конструкцію (опору), що справлятиме безпосередній вплив на ефективність роботи рятувальника та якість виконання професійних обов'язків, маємо обґрунтувати значення нормативного часу виконання навчальної вправи «закріплення рятувальної мотузки за конструкцію».

Мета роботи. Встановлення залежності часу виконання вправи «закріплення рятувальної мотузки за конструкцію» від рівня підготовки особового складу та температури довкілля (зимовий/літній період).

Методи досліджень. Проведено практичне дослідження виконання вправи «закріплення рятувальної мотузки за конструкцію» 1, 2, 3 та 4 способами із здобувачами освіти спеціальності «Пожежна безпека» Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. Ці дослідження проводились у літній та зимовий період із тими самими групами здобувачів освіти.

Основні результати. Ґрунтуючись на проведених дослідженнях, встановили, що під час виконання вправи у літній період 12 % здобувачів освіти усіх груп не виконали вправу, при цьому 40 % від загальної кількості виконали вправу на межі зарахування нормативу. У зимовий період незадовільні оцінки отримали 56 % здобувачів, а на межі зарахування нормативу – 27 %. Ці відсоткові значення свідчать про значний вплив температури довкілля на час виконання навчальної вправи «закріплення рятувальної мотузки за конструкцію». У літній період студенти виконали норматив на 45 %, а курсанти на 54 % краще відносно слухачів. У зимовий період студенти та курсанти показали рівень підготовки вищий за слухачів на 85 % та 149 % відповідно, що свідчить про вагомий вплив рівня підготовки.

Висновки. На основі досліджень встановлено залежність часу виконання вправи «закріплення рятувальної мотузки за конструкцію» від рівня підготовки особового складу та температури довкілля (зимовий/літній період). Зокрема, встановлено, що студенти та курсанти краще виконують норматив відносно слухачів на 45 % та 54 % у літній період та 85 % та 149 % у зимовий період. На основі резуль-

татів практичних тестувань здобувачів освіти обґрунтовано необхідність поділу виконання вправи на літній та зимовий період, оскільки більше половини здобувачів освіти усіх груп не виконала вправу за температури повітря від 0 °C до +5 °C.

Обґрунтовано та запропоновано значення нормативного часу виконання навчальної вправи «закріплення рятувальної мотузки за конструкцію» для підготовки особового складу пожежно-рятувальних підрозділів (частин).

Ключові слова: пожежна безпека, мотузка пожежна рятувальна, пожежний-рятувальник, вузол, нормативний час виконання вправи, практичні дослідження, тестування.

R. B. Veselivskyi, D. V. Smolyak, I. M. Polishchuk, A. A. Petrenko

Lviv State University of Life Safety

Lviv, Ukraine

STUDY OF THE EFFECTIVENESS METHODS OF FIXING OF THE LIFELINE TO THE STRUCTURE

Formulation of the problem. One of the elements of training for fire and rescue units is training exercises with a lifeline. The fire rescue rope is intended for use in rescue operations at height, firefighter self-rescue, work in confined spaces, organization of insurance when working in unsupported spaces and other rescue operations at height. For the effective use of a fire rescue rope, in each of the above cases, it is necessary to quickly and reliably fasten it to a structure (support). The personnel of fire and rescue units use 4 methods of securing a lifeline to a structure, which are regulated by law. These methods are effective, easy to knit and quite reliable. However, the standard time of the training exercise “fixing a lifeline to a structure”, which is a maximum of 5 seconds, is difficult, and the rush to perform it leads to incorrect tying and unreliability of the knot. It should be noted that the correctness and speed of this exercise will be influenced by the level of training of the personnel and the ambient temperature (winter/summer).

Given the importance of correct and reliable rope anchoring to a structure (support), which will have a direct impact on the rescuer’s performance and the quality of professional duties, it is necessary to justify the value of the standard time for the training exercise “anchoring a rescue rope to a structure”.

The purpose of the work. Establishing the dependence of the time of the exercise “fixing a lifeline to a structure” on the level of training of personnel and ambient temperature (winter/summer).

Research methods. A practical study of the exercise “fixing a rescue rope to a structure” in 1, 2, 3 and 4 methods was conducted with students of the specialty “Fire Safety” of the Lviv State University of Life Safety. These studies were conducted in summer and winter with the same groups of students.

Main results. Based on the research, it was found that when performing the exercise in the summer, 12 % of students of all groups did not perform the exercise, while 40 % of the total number performed the exercise on the verge of passing the standard. In winter, 56 % of applicants received unsatisfactory grades, and 27 % were on the verge of passing the standard. These percentage values indicate a significant effect of ambient temperature on the time of the training exercise “securing a lifeline to a structure”. In the summer, students fulfilled the standard by 45 %, and cadets were 54 % better than the trainees. In winter, students and cadets showed a level of training higher than that of trainees by 85 % and 149 %, respectively, which indicates a significant impact of the level of training.

Conclusions. Based on the research, the dependence of the time of the exercise “fixing a rescue rope to a structure” on the level of training of personnel and ambient temperature (winter/summer) was established. particular, it was found that students and cadets fulfill the standard better than trainees by 45 % and 54 % in summer and 85 % and 149 % in winter. Based on the results of practical tests of students, the necessity of dividing the exercise into summer and winter periods is substantiated, since more than half of the students of all groups did not perform the exercise at air temperatures from 0 °C to +5 °C.

The value of the normative time for the training exercise “fixing a rescue rope to a structure” for the training of personnel of fire and rescue units (units) is substantiated and proposed.

Key words: fire safety, fire rescue rope, firefighter-rescuer, knot, standard time of the exercise, practical research, testing.

Постановка проблеми. Упродовж 2024 року в Україні зареєстровано 105 214 пожеж, порівняно з 2023 роком. кількість пожеж збільшилась на 54,9 %. Унаслідок пожеж загинула 1 521 людина (53 дитини), 1 798 людей отримали травми (123 дитини). Кількість загиблих унаслідок пожеж

збільшилася на 3,6 %, а кількість травмованих – на 16,9 %.

Матеріальні втрати від пожеж склали 53 млрд 400 млн 047 тис. грн (з них прямі збитки становлять 24 млрд 633 млн 864 тис. грн; побічні – 28 млрд 766 млн 183 тис. гривень). Кількість знищених



Рис. 1. Основні показники, що характеризують стан із пожежами у державі у 2024 році порівняно з 2023 роком

і пошкоджених будинків (споруд) збільшилася на 26,7 % (36 359 од. проти 28 705 од.) [1].

На основі статистичних даних стану з пожежами в Україні та викликів сьогодення, а саме військової агресії з боку російської федерації, можна дійти висновку, що підготовка особового складу пожежно-рятувальних підрозділів повинна проводитися на високому рівні з постійним вдосконаленням, відповідаючи реаліям сьогодення.

Одним з елементів підготовки пожежно-рятувальних підрозділів є навчальні вправи з рятувальною мотузкою. Мотузка пожежна рятувальна (далі – мотузка) [1], призначена для використання під час проведення рятувальних робіт на висоті [2], саморятування пожежника, роботи в обмеженому просторі [3], організації страхування під час роботи в безпорному просторі та проведення інших аварійно-рятувальних робіт на висоті. Для ефективного застосування мотузки пожежної рятувальної у кожному із зазначених випадків необхідне її швидке та надійне закріплення за конструкцію (опору). Для закріплення мотузки за конструкцію використовують багато вузлів, як-от «булінь», «провідник вісімка», «штик», «пікетний вузол», «лісельний вузол», «глуха петля», «констриктор», «рифовий вузол», «кур'єрський вузол», «вузол Маршара», «вузол Бахмана», «Гарда» [4]. Ці типи вузлів у своїй діяльності використовують альпіністи, скелелазы, рятувальники, верхолази, працівники комунальних підприємств та інші спеціалісти, діяльність яких пов'язана з роботою на висоті.

Слід відзначити, що особовий склад пожежно-рятувальних підрозділів (частин) під час виконання рятувальних робіт на висоті, а також для здійснення саморятування переважно використовує

чотири способи закріплення рятувальної мотузки за конструкцію, які регламентовані [5]. Ці способи показали свою ефективність, і використовуються українськими пожежниками декілька десятиліть. Порівняно з вузлами, що наведені у джерелі [4], вони є простими у в'язанні та доволі надійні. Проте нормативний час навчальної вправи «закріплення рятувальної мотузки за конструкцію», що максимально складає 5 с, є складним, а поспіх виконання призводить до неправильного в'язання та ненадійності вузла. Також слід зауважити, що на правильність та швидкість виконання цієї вправи справлятимуть вплив рівень підготовки особового складу та температура довкілля (зимовий/літній період).

Враховуючи важливість правильного та надійного закріплення мотузки за конструкцію (опору), що справлятиме безпосередній вплив на ефективність роботи рятувальника та якість виконання професійних обов'язків, маємо обґрунтувати значення нормативного часу виконання навчальної вправи «закріплення рятувальної мотузки за конструкцію».

Огляд публікацій щодо способів закріплення рятувальної мотузки за конструкцію. Вузли використовують для закріплення мотузки за конструкцію, створення надійних петель, з'єднання мотузок однакового та різного діаметру тощо. У повсякденній службовій діяльності рятувальники (пожежники) під час проведення рятувальних операцій працюють з рятувальною мотузкою. У США та Великобританії [6], пожежники працюють з інструментами та рятувальним обладнанням, використовуючи різні тактики та навички в'язання вузлів. Найчастіше використовуються «напівзчіпний вузол», «Clove Hitch», «булінь»,

«провідник вісімка», «метелик», «далекобійник». Приклад використання рятувальної мотузки з альпійськими вузлом «метелик» наведено у джерелі [7] де великобританські пожежники під час перевірки димоходу закріпили та проклали мотузку від передньої до задньої частини будівлі над дахом. У Індії [8] для зв'язування або кріплення рятувальної мотузки задля підйому, обв'язування, перетягування або закріплення предметів використовують такі вузли: «вісімка», «рифовий вузол», «крісельний вузол», «овеча ніжка», «напівзв'язка», «булінь», «зубчаста зв'язка», «бекет-бэнд», «котяча лапа» тощо. Дослідження технік рятування за допомогою мотузки та рівня підготовки під час рятування з використанням мотузки представлено у джерелі [9]. Також способи використання рятувальних мотузок та вузлів наведено у роботах [10–13]. На особливу увагу заслуговує підготовка рятувальників та пожежників до роботи з рятувальними мотузками під час проведення рятування, пошуку потерпілих, їх деблокування та розбору завалів внаслідок ракетних бомбардувань. В такому разі проведення робіт на висоті, створення точок закріплення рятувальних мотузок має бути як швидким, так і надійним.

З огляду на проведений огляд та важливість аварійно-рятувальних робіт у системі підготовки рятувальників дослідження, спрямовані на підвищення ефективності способів закріплення рятувальної мотузки за конструкцію, є актуальним завданням.

Метою роботи є встановлення залежності часу виконання вправи «закріплення рятувальної мотузки за конструкцію» від рівня підготовки особового складу та температури довкілля (зимовий/літній період).

Основний матеріал. Впродовж року, в рамках службової підготовки, особовий склад пожежно-рятувальних підрозділів склав заліки з виконання навчальних вправ, де «закріплення рятувальної мотузки за конструкцію» є одним з основних нормативів. Нормативи виконання цієї навчальної вправи представлено у табл. 1.

Чинними вимогами [5] встановлено, що для особового складу пожежно-рятувальних підрозділів (частин) максимальний час виконання цієї вправи складає 5 с, що, очевидно, є недостатнім для виконання вправи. Також цими вимогами не встановлено поділ виконання вправи на літній та зимовий період, хоча цим самим документом поділ на літній та зимовий період передбачено у вправі «в'язання вузлів» для рятувальників-верхолазів, верхолазів та рятувальників гірських. При цьому граничний час виконання цього нормативу в зимовий період збільшується на 5 с, що складає 16 % від максимального нормативного часу (табл. 2).

Аналізуючи дані, що висвітлені в «Порядку організації службової підготовки осіб рядового і начальницького складу служби цивільного захисту», незрозумілим вважаємо підхід до встановлення часових рамок оцінювання нормативу. Що особовий склад пожежно-рятувальних підрозділів, що рятувальники-верхолази, верхолази та рятувальники гірські використовують типові рятувальні мотузки [14], і властивості мотузки в зимовий період (нижче 5 °C) є однаковими: вони твердішають та втрачають гнучкість. Відомо [15–17], що фізичні властивості волокнистих мотузок, як-от еластичність та гнучкість, погіршуються зі зниженням їх температури.

Практичні дослідження та тестування. Для обґрунтування значення нормативного часу

Таблиця 1

Нормативи виконання навчальної вправи «закріплення рятувальної мотузки за конструкцію» для підготовки особового складу пожежно-рятувальних підрозділів (частин)

№ з/п	Назва навчальної вправи	Розрахунок для виконання навчальної вправи	Оцінка виконання навчальної вправи			Умови виконання навчальної вправи
			відмінно	добре	задовільно	
Навчальні вправи з рятувальною мотузкою						
1	Закріплення рятувальної мотузки за конструкцію	Пожежний-рятувальник	3 с	4 с	5 с	Пожежний-рятувальник, одягнений у захисний одяг пожежника та спорядження, перебуває в 1 м від конструкції. Рятувальна мотузка розмотана, кінець мотузки довжиною 50 см знаходиться в руці пожежного-рятувальника. Початок: подано команду «Рятувальну мотузку за конструкцію закріпити». Закінчення: рятувальна мотузка закріплена за конструкцію, вузол надійно зав’язаний

Примітка: нормативний час збільшується на 1 с під час виконання навчальної вправи пожежним-рятувальником з включенням у засіб індивідуального захисту органів дихання (далі – ЗІЗОД).

Нормативи виконання навчальної вправи «в'язання вузлів» для рятувальників-верхолазів, верхолазів та рятувальників гірських

№ з/п	Назва навчальної вправи	Розрахунок для виконання навчальної вправи	Оцінка виконання навчальної вправи			Умови виконання навчальної вправи
			відмінно	добре	задовільно	
Навчальні вправи з рятувальною мотузкою						
1	В'язання вузлів	Рятувальник	Літній період			Рятувальник, вдягнутий в ІСС та спорядження, перебуває біля конструкції. Основна мотузка довжиною від 40 м збуктована та приєднана до ІСС за допомогою карабіна. Початок: подано команду «Мотузку за конструкцію (зазначається місце кріплення) закріпити». Закінчення: мотузка закріплена за конструкцію, вузол надійно зав'язаний
			30 с	35 с	40 с	
			Зимовий період			
			35 с	40 с	45 с	

виконання навчальної вправи «закріплення рятувальної мотузки за конструкцію» проведені практичне відпрацювання та дослідження із залученням курсантів, студентів та слухачів спеціальності «Пожежна безпека» Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. Ці дослідження проводились у літній та зимовий період з тими самими групами здобувачів освіти.

Для практичних досліджень було сформовано три групи, а саме:

- 1 група – студенти другого курсу навчання в кількості 54 осіб;
- 2 група – слухачі другого курсу навчання в кількості 59 осіб;
- 3 група – курсанти другого курсу навчання в кількості 55 осіб.

Кожен здобувач освіти кріпив мотузку за конструкцію 1, 2, 3 та 4 способами.

Перед проведенням досліджень часу виконання навчальної вправи «закріплення рятувальної мотузки за конструкцію» здобувачам освіти було доведено та продемонстровано правильність

виконання вправи. Усім здобувачам освіти було надано однаковий час на підготовку та відпрацювання вправи.

Практичний дослід поділено на два періоди – літній та зимовий. В літньому періоді складання нормативів проводилось у тренінговому центрі рятувальних робіт Львівського державного університету безпеки життєдіяльності за температури у приміщенні +18 °С. Результати тестування 1-ї групи у літній період представлено на рис. 2.

З отриманих результатів встановлено, що 2 та 4 способи закріплення мотузки за конструкцію виконувались швидше за 1 та 3 способи. Кількість студентів, що не вклались у максимальний нормативний час (5 с), складає 25 осіб, що становить 12 % від загальної кількості. При цьому слід зауважити, що 63 особи (29 % від загальної кількості) виконали вправу на оцінку «задовільно».

Результати тестування 2-ї групи у літній період представлено на рис. 3.

Отримані результати також свідчать про те, що 2 та 4 способи закріплення мотузки за конструкцію

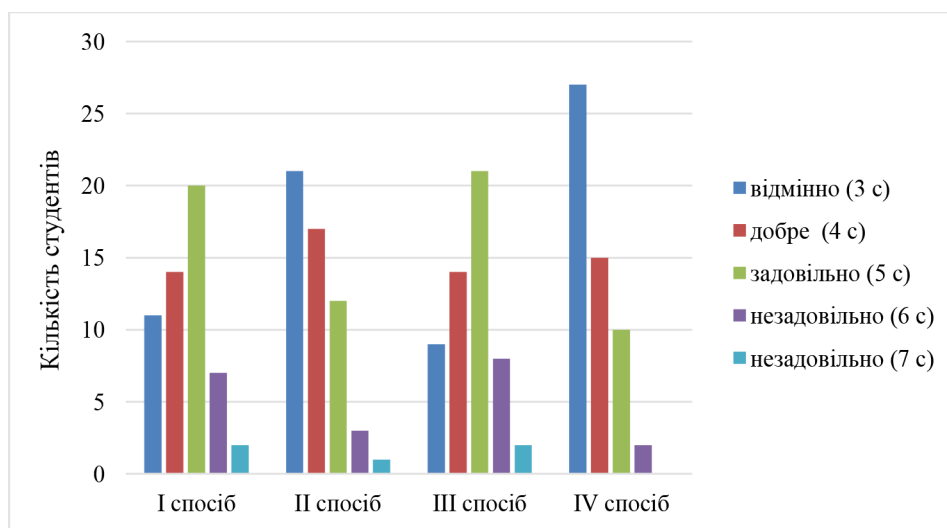


Рис. 2. Результати тестування 1-ї групи у літній період

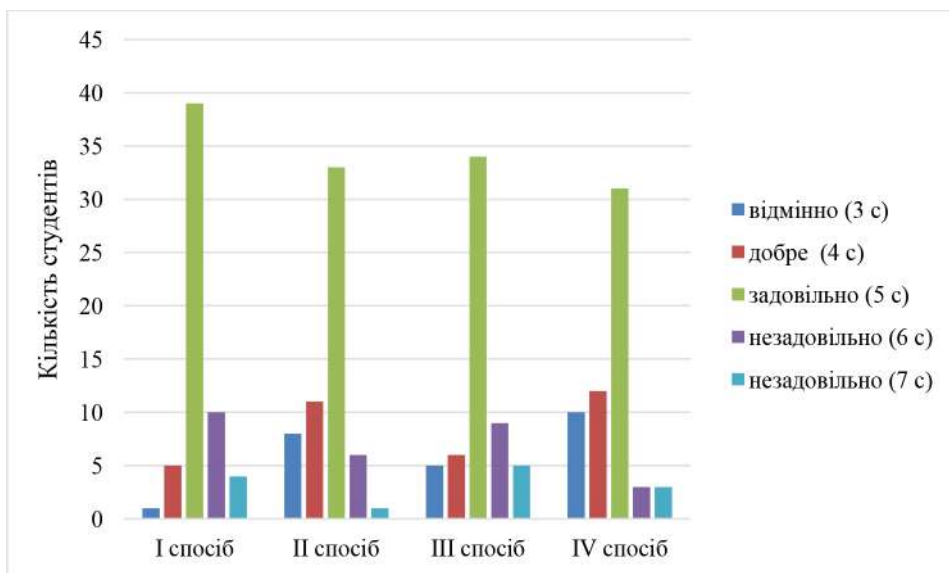


Рис. 3. Результати тестування 2-ї групи у літній період

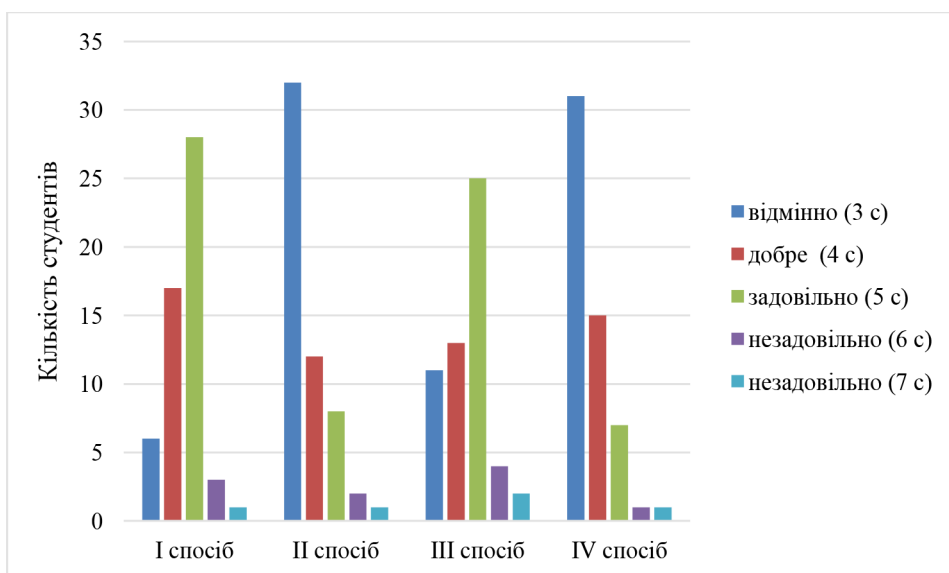


Рис. 4. Результати тестування 3-ї групи у літній період

виконуються швидше за 1 та 3 способи. Кількість слухачів, що не вклались у максимальний нормативний час (5 с), складає 41 особа, що становить 17 % від загальної кількості. При цьому 137 осіб (58 % від загальної кількості) виконали вправу на оцінку «задовільно».

Результати тестування 3-ї групи у літній період представлено на рис. 4.

2 та 4 способи закріплення мотузки за конструкцію знову виконуються швидше за 1 та 3 способи. Кількість курсантів, що не вклались у максимальний нормативний час (5 с), складає 15 осіб, що становить 7 % від загальної кількості. При цьому 68 осіб (31 % від загальної кількості) виконали вправу на оцінку «задовільно».

Наступним етапом досліджень було проведення тестування у зимовий період з тими самими групами здобувачів освіти на території

навчально-спортивного комплексу Львівського державного університету безпеки життєдіяльності за температури повітря від 0 °С до +5 °С.

Результати тестування 1-ї групи у зимовий період представлено на рис. 5.

Результати досліджень, показують, що 2 та 4 способи закріплення мотузки за конструкцію виконувались також швидше за 1 та 3 способи. Кількість студентів, що не вклались у максимальний нормативний час (5 с), складає 110 осіб, що становить 51 % від загальної кількості. При цьому 67 осіб (31 % від загальної кількості) виконали вправу на оцінку «задовільно».

Результати тестування 2-ї групи у зимовий період представлено на рис. 6.

Отримані результати також свідчать про те, що 2 та 4 способи виконуються швидше за 1 та 3. Кількість слухачів, що не вклались у максимальний

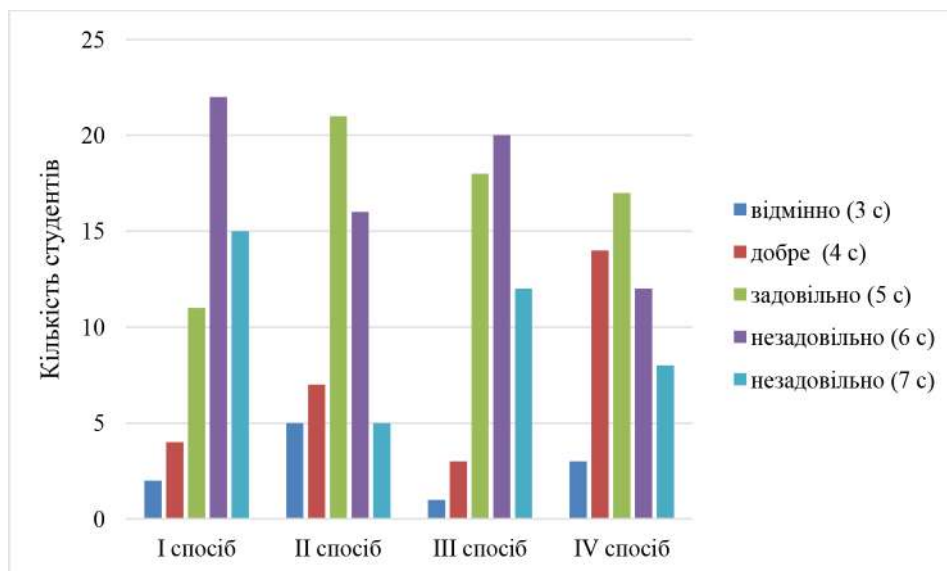


Рис. 5. Результати тестування 1-ї групи у зимовий період

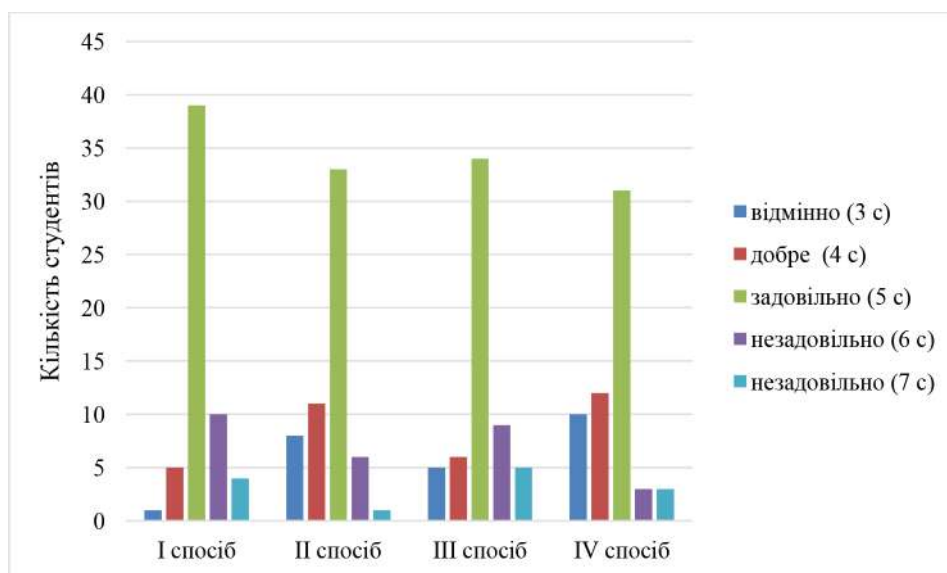


Рис. 6. Результати тестування 2-ї групи у зимовий період

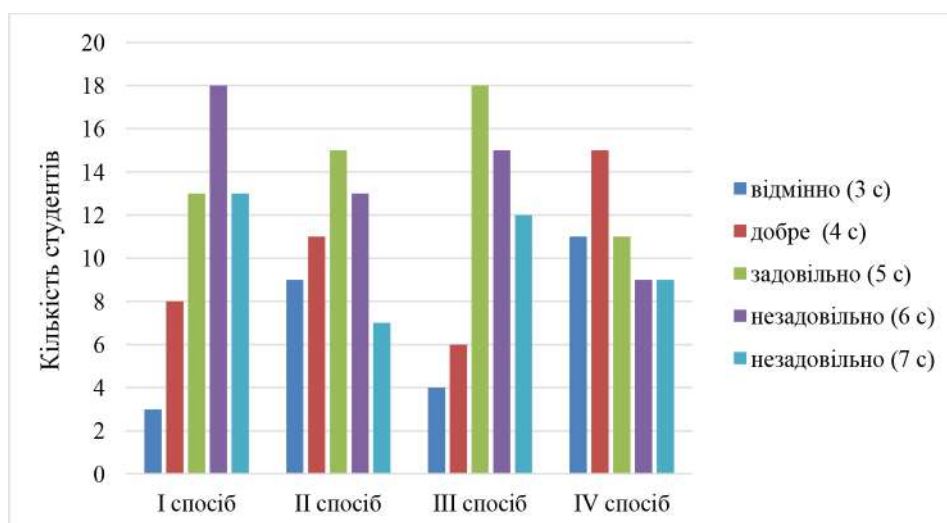


Рис. 7. Результати тестування 3-ї групи у зимовий період

нормативний час (5 с), складає 167 осіб, що становить 71 % від загальної кількості. При цьому 55 осіб (23 % від загальної кількості) виконали вправу на оцінку «задовільно».

Результати тестування 3-ї групи у зимовий період представлено на рис. 7.

Отримані дані також підтверджують, що 2 та 4 способи виконуються швидше за інші. Кількість курсантів, що не вклались у максимальний нормативний час (5 с), складає 96 осіб, що становить 44 від загальної кількості. При цьому 57 осіб (26 % від загальної кількості) виконали вправу на оцінку «задовільно».

Зведені дані щодо практичних досліджень та тестувань здобувачів освіти представлено у табл. 3.

Аналізуючи отримані результати досліджень, встановили, що під час виконання вправи у літній період 12 % здобувачів освіти усіх груп не виконали вправу, при цьому 40 % від загальної кількості виконали вправу на межі зарахування нормативу. У зимовий період незадовільні оцінки

отримали 56 % здобувачів, а на межі зарахування нормативу – 27 %. Ці відсоткові значення свідчать про значний вплив температури довкілля на час виконання навчальної вправи «закріплення рятувальної мотузки за конструкцію». Також слід зазначити, що студенти на 45 % та курсанти на 54 % краще виконали норматив у літній період відносно слухачів. У зимовий період студенти та курсанти показали рівень підготовки вищий за слухачів на 85 % та 149 % відповідно, що свідчить про вагомий вплив рівня підготовки.

Враховуючи значний вплив рівня підготовки особового складу та температури довкілля на ефективність закріплення (правильність та надійність) мотузки пожежної рятувальної за конструкцію (опору), пропонуємо збільшити нормативний час виконання навчальної вправи «закріплення рятувальної мотузки за конструкцію» до значень, наведених у табл. 4.

Запропонований нормативний час виконання навчальної вправи «закріплення рятувальної мотузки за конструкцію», вочевидь, вплине на

Таблиця 3

Дані практичних досліджень та тестувань здобувачів освіти

Здобувачі освіти	Кількість спроб, разів	Відсоткове значення часу виконання навчальної вправи «закріплення рятувальної мотузки за конструкцію» 1, 2, 3 та 4 способами, %					
		Літній період			Зимовий період		
		«відмінно і добре», 3–4 с	«задовільно», 5 с	«незадовільно», 6–7 с	«відмінно і добре», 3–4 с	«задовільно», 5 с	«незадовільно», 6–7 с
1 група (студенти)	216	59	29	12	18	31	51
2 група (слухачі)	236	25	58	17	6	23	71
3 група (курсанти)	220	62	31	7	30	26	44

Таблиця 4

Запропоновані нормативи виконання навчальної вправи «закріплення рятувальної мотузки за конструкцію» для підготовки особового складу пожежно-рятувальних підрозділів (частин)

№ з/п	Назва навчальної вправи	Розрахунок для виконання навчальної вправи	Оцінка виконання навчальної вправи			Умови виконання навчальної вправи
			відмінно	добре	задовільно	
Навчальні вправи з рятувальною мотузкою						
1	Закріплення рятувальної мотузки за конструкцію	Пожежний-рятувальник	Літній період			Пожежний-рятувальник, одягнений у захисний одяг пожежника та спорядження, перебуває в 1 м від конструкції. Рятувальна мотузка розмотана, кінець мотузки довжиною 50 см знаходиться в руці пожежного-рятувальника. Початок: подано команду «Рятувальну мотузку за конструкцію закріпити». Закінчення: рятувальна мотузка закріплена за конструкцію, вузол надійно зав'язаний
			4 с	5 с	6 с	
			Зимовий період			
			5 с	6 с	7 с	

Примітка: нормативний час збільшується на 1 с під час виконання навчальної вправи пожежним-рятувальником з включенням у ЗІЗОД

правильність в'язання мотузки та надійність вузла.

Загальні висновки. За результатами проведених досліджень встановлено залежність часу виконання вправи «закріплення рятувальної мотузки за конструкцію» від рівня підготовки особового складу та температури довкілля (зимовий/літній період). Зокрема, встановлено, що студенти та курсанти краще виконують норматив відносно слухачів на 45 % та 54 % у літній період та 85 % і 149 % у зимовий період. На основі результатів практичних тестувань здобувачів освіти обґрунтовано необхідність поділу виконання вправи на літній та зимовий період, оскільки більше половини здобувачів освіти усіх груп не виконало вправу за температури повітря від 0 °С до +5 °С.

Обґрунтовано та запропоновано значення нормативного часу виконання навчальної вправи «закріплення рятувальної мотузки за конструкцію» для підготовки особового складу пожежно-рятувальних підрозділів (частин).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Веселівський Р. Б., Клим'юк М. М., Панчишин Ю. І., Смоляк Д. В. Вдосконалення способу змотування мотузки пожежної рятувальної в клубок. *Пожежна безпека*. 2023. № 42. С. 23–31. DOI: 10.32447/20786662.42.2023.03
2. Веселівський Р. Б., Смоляк Д. В., Баран Ю. С., Павук І. В., Дуленко Д. І. Способи проведення рятувальних робіт при порятунку потерпілого, який завис на висоті. *Вісник ЛДУБЖД*. 2021. № 24. С. 66–73. DOI: 10.32447/20784643.24.2021.08
3. Смоляк Д. В., Баран Ю. С. Методика використання системи поліспаств для проведення аварійно-рятувальних та інших невідкладних робіт в обмеженому просторі (підземних колекторах, колодязях). *Пожежна безпека*. 2019. № 35. С. 69–74. DOI: 10.32447/20786662.35.2019.11
4. Типи вузлів і петель: довідник для працівників правоохоронних органів / В. Ю. Шепітько, Г. К. Авдєєва, С. В. Волобуєва та ін. Харків : Право, 2007. 116 с.
5. Про затвердження Порядку організації службової підготовки осіб рядового і начальницького складу служби цивільного захисту: Наказ МВС України від 15 червня 2017 року № 511. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0835-17#Text> (дата звернення: 20.04.2025).
6. Fire Dept. Family, Different Kinds of Firefighter Knots: офіційний сайт. URL: <https://firedeptfamily.com/different-kinds-of-firefighter-knots> (дата звернення: 22.04.2025).
7. Devo Line, How Alpine butterfly knots kept firefighters safe in complex chimney fire: офіційний сайт. URL: <https://www.devonlive.com/news/devon-news/how-alpine-butterfly-knots-kept-1262977> (дата звернення: 22.04.2025).

8. IFSC, Fire & Safety Training – Types of Knots: офіційний сайт. URL: <https://www.ifsccollege.in/blog/fire-safety-training-types-of-knots> (дата звернення: 22.04.2025).

9. McWilliams, Brenna & Rohr, Linda & Sanli, Elizabeth & Carnahan, Heather. (2019). Learning to prepare hauling systems for rope rescue. *International Journal of Training Research*. № 17. Р. 1–13. DOI: 10.1080/14480220.2019.1685862

10. The Trad Climber's Guide To Problem Solving: Self-Rescue Techniques Paperback – June 20, 2019. Publisher, Independently published (June 20, 2019).

11. Yuhai Zhang *et al* Comparative Analysis of Typical Grab Knots Force Test in Rope Rescue (2021) *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 831 012021. DOI: 10.1088/1755-1315/831/1/012021

12. James A. Frank, Jerrold B. Smith. (2014) CMC Rope Rescue Manual.

13. Vines Tom. Hudson Steve. (2012) High Angle Rescue Techniques.

14. Про затвердження Норм табельної належності, витрат і термінів експлуатації пожежно-рятувального, технологічного і гаражного обладнання, інструменту, індивідуального озброєння та спорядження, ремонтно-експлуатаційних матеріалів підрозділів ДСНС України: Наказ ДСНС України від 29 травня 2013 року № 358. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0358388-13#n12> (дата звернення: 26.05.2025).

15. Li, W., Liu, X., Li, G., Lin, S., Li, H., & Ge, Y. (2023). Temperature and Humidity Effects on the Dynamic Stiffness of a Polyester Mooring Rope. *Journal of Marine Science and Engineering*. № 11(1). Р. 91. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse11010091>

16. McKenna H. A., Hearle J. W. S., O'Hear N. Handbook of rope technology. 1st ed. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2004, 432 p.

17. Le Clerc, C., Bunsell, A. R., Piant, A. Influence of temperature on the mechanical behavior of polyester fibres. *J. Mater. Sci.* 2006. № 41. Р. 7509–7523.

REFERENCES

1. Veselivskyy R. B., Klymiuk M. M., Panchyshyn Yu. I., Smolyak D. V. (2023) Vdoskonalennia sposobu zmotuvannia motuzky pozhezhnoi riatsuvalnoi v klubok [Improvement of the winding method a fire rescue rope into a ball]. *Fire Safety*, 42, 23–31 [in Ukrainian]. DOI: 10.32447/20786662.42.2023.03
2. Veselivskyy R. B., Smolyak D. V., Baran Y. S., I. V. Pavuk, Dulenko D. I. (2021) Sposoby provedennia riatsuvalnykh robot pry poriatunku poterpiloho, yakyyi zavys na vysoti [Methods of conducting rescue works at rescue of the victim who hung at a height]. *Bulletin of Lviv State University of Life Safety*, 24, 66–73 [in Ukrainian]. DOI: 10.32447/20784643.24.2021.08
3. Smolyak D. V., Baran Y. S. (2019) Metodyka vykorystannia systemy polispastiv dlia provedennia avariino-riatsuvalnykh ta inshykh nevidkladnykh robot v obmezhenomu prostori (pidzemnykh kolektorakh, kolodiazakh) [Method of using polyspast system

for conducting emergency and rescue operations in a confined space (underground collectors, wells)]. *Pozhezhna bezpeka*, 35, 69–74 [in Ukrainian]. DOI: 10.32447/20786662.35.2019.11

4. Shepitko V. Yu., Avdieieva H. K., Voloibuieva S. V. ta in. (2007) *Typy vuzliv i petel: Dovidnyk dlia pratsivnykiv pravookhoronnykh orhaniv*. Kharkiv : Pravo 91 s. [in Ukrainian].

5. Nakaz Ministerstva vnutrishnikh sprav Ukrainy Pro zatverdzhennia Poriadku orhanizatsii sluzhbovoi pidhotovky osib riadovoho i nachalnytskoho skladu sluzhby tsyvilnoho zakhystu vid 15 chervnia 2017 roku № 5111 [On Approval of the Procedure for Organizing Service Training of Privates and Commanders of the Civil Protection Service]. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0835-17#Text> [in Ukrainian].

6. Fire Dept. Family, Different Kinds of Firefighter Knots. URL: <https://firedeptfamily.com/different-kinds-of-firefighter-knots> [in English].

7. Devo Line, How Alpine butterfly knots kept firefighters safe in complex chimney fire. URL: <https://www.devonlive.com/news/devon-news/how-alpine-butterfly-knots-kept-1262977> [in English].

8. IFSC, Fire & Safety Training – Types of Knots. Retrieved from: <https://www.ifsccollege.in/blog/fire-safety-training-types-of-knots> [in English].

9. McWilliams, Brenna & Rohr, Linda & Sanli, Elizabeth & Carnahan, Heather. (2019). Learning to prepare hauling systems for rope rescue. *International Journal of Training Research*. 17. 1–13. 10.1080/14480220.2019.1685862

10. The Trad Climber's Guide to Problem Solving: Self-Rescue Techniques Paperback – June 20, 2019. Publisher. Independently published (June 20, 2019).

11. Yuhai Zhang *et al* Comparative Analysis of Typical Grab Knots Force Test in Rope Rescue (2021) *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 831 012021. DOI 10.1088/1755-1315/831/1/012021

12. James A. Frank, Jerrold B. Smith. (2014) *CMC Rope Rescue Manual*.

13. Vines Tom. Hudson Steve. (2012) *High Angle Rescue Techniques*.

14. Nakaz Derzhavnoi sluzhby Ukrainy z nadzvychainykh sytuatsii Pro zatverdzhennia Norm tabelnoi nalezhnosti, vytrat i terminiv ekspluatatsii pozhezhno-riatuvalnoho, tekhnolohichnoho i harazhnoho obladnannia, instrumentu, indyvidualnoho ozbroiennia ta sporiadzhennia, remontno-ekspluatatsiinykh materialiv pidrozdiliv DSNS Ukrainy vid 29 travnia 2013 roku № 358 [On the approval of the Norms of the personnel record, costs and terms of operation of fire-rescue, technological and garage equipment, tools, individual weapons and equipment, repair and operational materials of the units of the State Emergency Service of Ukraine]. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0358388-13#n12> [in Ukrainian].

15. Li, W., Liu, X., Li, G., Lin, S., Li, H., & Ge, Y. (2023). Temperature and Humidity Effects on the Dynamic Stiffness of a Polyester Mooring Rope. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(1), 91. <https://doi.org/10.3390/jmse11010091>

16. McKenna H. A., Hearle J. W. S. and O'Hear N. *Handbook of rope technology*, 1st ed. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2004, 432 p.

17. Le Clerc, C., Bunsell, A. R., Piant, A. Influence of temperature on the mechanical behavior of polyester fibres. *J. Mater. Sci.* 2006, 41, 7509–7523.

© Р. Б. Веселівський, Д. В. Смоляк, І. М. Поліщук, А. А. Петренко

Науково-методична стаття.

Надійшла до редакції 25.04.2025.

Прийнято до публікації 04.06.2025



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.46.2025.03>

С. Я. Вовк, О. В. Шаповалов, А. П. Кушнір, Н. О. Ференц
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
м. Львів, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5278-3754> – С. Я. Вовк
<https://orcid.org/0000-0001-8444-2006> – А. П. Шаповалов
<https://orcid.org/0000-0002-6946-8395> – А. П. Кушнір
<https://orcid.org/0000-0003-3139-0921> – Н. О. Ференц
✉ sergiy_vovk@ukr.net

АНАЛІЗ ШЛЯХІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ ВИСОТНИХ БУДІВЕЛЬ

Швидка розбудова міст в умовах дефіциту земельних ресурсів, удосконалення будівельних технологій, що передбачають використання нових речовин та матеріалів, спонукає забудовників зводити будівлі, які займають невелику земельну ділянку, але є значними за житловою площею та площею іншого призначення.

Конструктивні та архітектурні особливості висотних будівель висувають високі вимоги до забезпечення протипожежного захисту людей та майна. Законодавство України регламентує низку заходів, спрямованих на забезпечення протипожежного захисту висотних будівель, які часто з різних причин нівелюються людським фактором.

Для забезпечення протипожежного захисту висотних будівель використовуються різні підходи та методи, зокрема встановлення систем автоматичної пожежної сигналізації, автоматичних систем пожежогасіння, забезпечення належного експлуатування електротехнічного обладнання і наявних систем протипожежного захисту, підвищення ефективності евакуаційних заходів, а також використання останніх інноваційних досягнень науки і техніки зі впровадженням таких технологій, як відеоаналітика, штучний інтелект, для швидкого і безпомилкового виявлення пожежі, що може якісно вплинути на протипожежний захист зазначених об'єктів.

У статті проведено аналіз шляхів забезпечення протипожежного захисту висотних будівель, які застосовуються на території України та за кордоном, задля подальшого їх удосконалення та надання рекомендацій щодо підвищення ефективності виявлення та гасіння пожеж.

Для дослідження пожежної безпеки висотних будинків був використаний аналіз вимог нормативних документів, а також літературних джерел щодо нових підходів до вдосконалення протипожежного захисту цих будівель задля пошуку оптимальних, доцільних способів протипожежного захисту.

Для досягнення поставленої мети, окрім використання адресних СПС та спринклерних систем водяного пожежогасіння, якими захищаються висотні будівлі, необхідно провести низку досліджень задля визначення залежностей місць розміщення елементів СПЗ на швидкість виявлення загорання та ймовірності впливу сторонніх факторів на помилкові спрацювання.

Наслідки від пожеж, які виникли у висотних будівлях, зазначають на необхідність проведення досліджень у напрямі побудови більш ефективних механізмів захисту цих будівель від загорань. Створення таких механізмів лежить у напрямі використання сучасного інноваційного обладнання у поєднанні з інтелектуальними системами отримання, обробки та передачі інформації.

Ключові слова: протипожежний захист, висотні будинки, системи виявлення пожежі.

ANALYSIS OF WAYS TO PROVIDE FIRE PROTECTION FOR HIGH-RISE BUILDINGS

Rapid urban development in conditions of land resource shortage, improvement of construction technologies involving the use of new substances and materials, encourages developers to erect buildings that occupy a small land plot, but are significant in terms of living space and area for other purposes.

The structural and architectural features of high-rise buildings impose high requirements for ensuring fire protection of people and property. The legislation of Ukraine regulates a number of measures aimed at ensuring fire protection of high-rise buildings, which in many cases are leveled by the human factor for various reasons.

Various approaches and methods are used to ensure fire protection of high-rise buildings, including the installation of automatic fire alarm systems, automatic fire extinguishing systems, ensuring the proper operation of electrical equipment and existing fire protection systems, increasing the efficiency of evacuation measures, as well as using the latest innovative achievements of science and technology, introducing technologies such as video analytics, artificial intelligence, etc. for quick and accurate fire detection, which can have a qualitative impact on the fire protection of these facilities.

This article analyzes the ways to ensure fire protection of high-rise buildings, which are used in Ukraine and abroad, in order to further improve them and provide recommendations for increasing the efficiency of fire detection and extinguishing.

To study the fire safety of high-rise buildings, an analysis of the requirements of regulatory documents was used, as well as literary sources on new approaches to improving the fire protection of these buildings, in order to find optimal, appropriate methods of fire protection.

To achieve the goal, in addition to the use of addressable fire extinguishing systems and sprinkler water fire extinguishing systems, which protect high-rise buildings, it is necessary to conduct a number of studies in order to determine the dependence of the locations of fire extinguishing elements on the speed of fire detection and the probability of the influence of external factors on false alarms.

The consequences of fires that have occurred in high-rise buildings indicate the need to conduct research in the direction of building more effective mechanisms for protecting these buildings from fires. The creation of such mechanisms lies in the use of modern innovative equipment in combination with intelligent systems for receiving, processing and transmitting information.

Key words: fire protection, high-rise buildings, fire detection systems.

Постановка проблеми. Збільшення темпів науково-технічного прогресу як визначальний чинник у підвищенні якості будівництва і забезпечення пожежної безпеки шляхом вдосконалення систем протипожежного захисту (СПЗ) є основною умовою для інтенсифікації сучасної висотної будівельної галузі в Україні. Урбанізація та збільшення густоти населення призводять до збільшення кількості будівель житлового призначення, зокрема висотних. Такі будівлі надають великим містам виняткової виразності та сучасного індивідуального вигляду.

Висотні будівлі належать до об'єктів, в яких одночасно може перебувати більше 100 людей. Зазвичай вони мають підземні паркінги, а на перших поверхах розташовані приміщення громадського призначення. Пожежі та аварії у таких будівлях можуть призводити до значних жертв.

Підрозділами територіальних органів ДСНС упродовж 9 місяців 2024 року в Україні у житлових будинках та спорудах зареєстровано 20 433 пожежі [1].

За останні роки через пожежі сталися незворотні руйнування будівельних конструкцій висотних будівель різних архітектурних форм як в Україні, так і за кордоном (рис. 1).

Існує чимало прикладів пожеж фасадів будівель, які не відповідають протипожежним нормам. Вони супроводжуються поширенням вогню периметром будинку та руйнуванням фасадних конструкцій (рис. 2).

Яскравим підтвердженням цього стала масштабна пожежа, що виникла в Одесі 29 серпня 2015 року у житловому комплексі “Gagarinn Plaza”, яка за три години з 24-го поверху донизу поширилась на площу 3 000 м². Під час її гасіння, яке тривало більше чотирьох годин, троє співробітників пожежно-рятувальних підрозділів отримали травми. Житловий комплекс було здано в експлуатацію у 2014 році. Причиною швидкого поширення пожежі працівники ДСНС України називають порушення державних архітектурно-будівельних норм, а також відсутність внутрішнього протипожежного водопостачання [2].



а



б



в

Рис. 1. Пожежі у висотних будинках в розвинутих країнах світу: а – факельна вежа (Дубай, 2015 рік); б – Grenfell Tower (Лондон, 2017 рік); в – Едіфіціо Вілтон Паес де Алмейда (Бразилія, 2018 рік)



Рис. 2. Поширення пожежі у висотних будівлях



Рис. 3. Наслідки пожежі в 32-поверховому хмарочосі (Мадрид. Іспанія, 2005 рік)

Відсутність працюючої СПЗ у 32 поверховому хмарочосі «Віндзор» призвела до того, що пожежа, яка виникла на верхніх поверхах, швидко поширилась на всю будівлю, і це призвело до незворотної шкоди. Пожежа повністю знищила хмарочос висотою 106 метрів (рис. 3). Займання сталося на 21 поверсі через коротке замикання в електропроводці.

У місті Стамбул, найбільшому місті Туреччини, 17 липня 2012 року сталася серйозна пожежа у 42-поверховому хмарочосі “Polat Tower” висотою 152 метри. Ця будівля має багатофункціональне призначення і містить квартири, торговельні площі, офіси, кафе та інші приміщення. Зі стін палаючої будівлі вниз падали кулі з розплавленої пластмаси.

Уникненню жертв допомогла досконала система безпеки будівлі.

21 лютого 2015 року виникла пожежа в одному з найвищих житлових хмарочосів у світі, відомому як «Смолоскип», або “The Torch”, розташований у місті Дубаї, Об’єднаних Арабських Еміратів. Цей хмарочос був зведений у 2011 році. Висота будівлі складає 336 метрів, 79 поверхів. Вартість будівництва перевищила 180 мільйонів доларів США. Пожежа виникла на 50 поверсі.

На основі статистики пожеж у США та Великій Британії у роботі [3] зазначено, що основні причини пожеж у житлових будинках – це куріння, несправність електрообладнання та відкрите полум’я. М’які меблі, постільна білизна та матраци є першими предметами, які загоряються

від недопалків (сигарет) та відкритого вогню (сірники, запальнички), що призводить до більшості смертельних випадків. Пожежі від електромереж житлових будинків, на думку авторів [3], посідають друге місце за кількістю смертельних випадків.

Згідно з даними Національної асоціації пожежних США, з 2017 по 2021 роки місцеві пожежні служби щорічно реагували в середньому на 52 948 пожеж. Аналіз показує, що рівень смертності на 1 000 зареєстрованих пожеж у будинках, обладнаних спринклерними системами пожежогасіння, був на 90 % нижчим порівняно з будинками, де такі системи були відсутні (рис. 4).

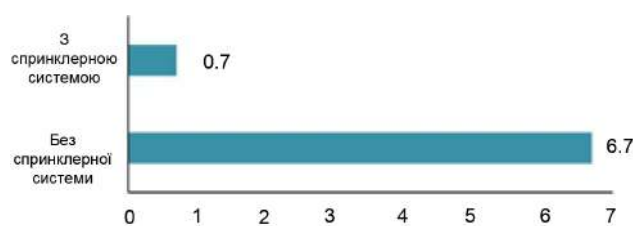


Рис. 4. Рівень смертності на 1 000 зареєстрованих пожеж

Як показано на рис. 5, рівень травмування серед цивільного населення на 1 000 зареєстрованих пожеж у будинках, обладнаних спринклерними системами, був на 31 % нижчим порівняно з будинками, де відсутні автоматичні системи пожежогасіння (АСПГ). Значна частина травм у таких будинках виникла внаслідок пожеж, масштаб яких був недостатнім для активації спринклерів. Ймовірно, деякі постраждали отримали травми під час спроб самостійно загасити пожежу до моменту спрацювання системи.

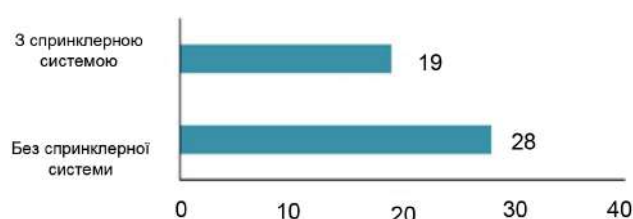


Рис. 5. Рівень травмування на 1 000 зареєстрованих пожеж

У період з 2017 по 2021 роки спринклерні системи активувалися у 92 % випадків пожеж, за умови їх наявності та достатньої інтенсивності пожежі для спрацювання системи. З-поміж пожеж, у яких системи були активовані, у 97 % випадків вони виявилися ефективними у локалізації пожежі. Сукупний аналіз цих показників свідчить про те, що спринклерні системи ефективно спрацювали у 89 % пожеж, які досягли інтенсивності, необхідної для їх активації.

Найпоширенішою причиною відмов спрацювання АСПГ було вимкнення цих систем. Інші причини відмов показано на рис. 6.

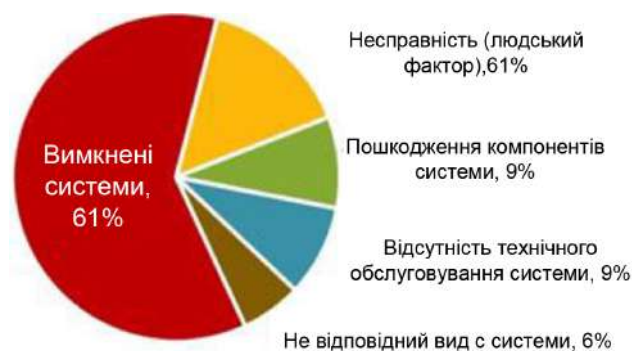


Рис. 6. Причини відмов АСПГ

Найнижчий рівень смертності на 1 000 зареєстрованих пожеж був зафіксований у будинках, обладнаних як спринклерними системами, так і дрововими димовими сповіщувачами. Як показано на рис. 7, порівняно з об'єктами, де відсутні як димові сповіщувачі, так і автоматичні системи пожежогасіння (AES), включно з будівлями на стадії будівництва, рівень смертності зменшувався залежно від наявних засобів пожежної безпеки:

- на 34 % – у випадках наявності димових сповіщувачів, що працюють на батарейках, без активної АСПГ;
- на 51 % – за наявності димових сповіщувачів з будь-яким джерелом живлення, без системи АСПГ;
- на 71 % – у будинках з дрововими димовими сповіщувачами, без використання АСПГ;
- на 92 % – у випадках, коли будинок був оснащений як спринклерною системою, так і дрововими димовими сповіщувачами.

Зазначені показники ґрунтуються на наявності різних типів протипожежного захисту. Варто підкреслити, що незначні пожежі в будинках, обладнаних СПС з димовими сповіщувачами, частіше спричиняють виклик пожежної служби, ніж аналогічні випадки у будинках з автономними пожежними сповіщувачами. Як наслідок, такі інциденти частіше фіксуються у звітності. Зазвичай автоматичні димові сповіщувачі є підключеними до приймальних приладів за допомогою дротів (шлейфів пожежної сигналізації).

За даними Міністерства внутрішніх справ Великої Британії, у період з квітня 2023 року по березень 2024 року 29 % пожеж у житлових приміщеннях сталися за наявності сповіщувача, який не спрацював або не подав сигнал тривоги. Основними причинами неспрацювання СПС є: 47 % – продукти горіння не досягли пожежних сповіщувачів; 16 % – пожежа виникла в зоні, не обладнаною

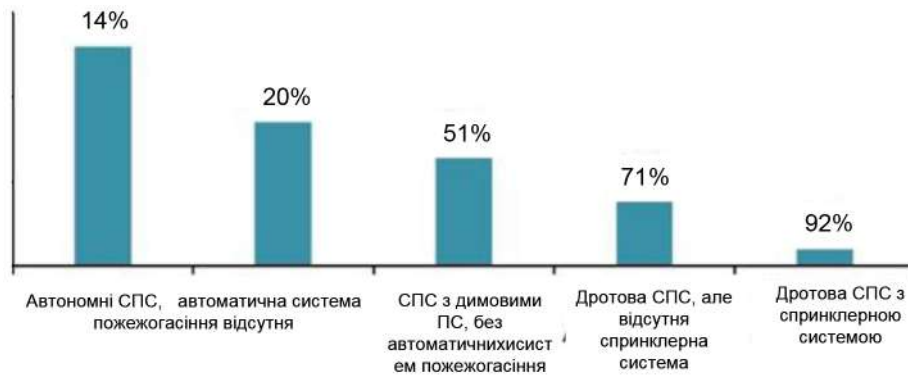


Рис. 7. Рівень смертності на 1 000 зареєстрованих пожеж

СПС; 3,2 % – джерела живлення у автономних пожежних сповіщувачах; 4 % – несправність джерела живлення; 2,9 % – несправна або неправильно встановлена СПС; 23 % – інші причини, зокрема пошкодження СПС вогнем або невідомі фактори; 4 % – інші фактори, що завадили спрацюванню.

У Лондоні пожежна служба відреагувала на 52 000 хибних тривог за рік. 98 % повідомлень про пожежу були хибними, з яких 90 % спричинені несправностями обладнання.

Згідно з аналізом, проведеним компанією “Personal Injury Claims UK”, було встановлено, що за останні п’ять років пожежно-рятувальні служби Великої Британії відреагували на 747 902 хибні тривоги. Ці помилкові виклики призвели до значного навантаження на ресурси, як фінансово, так і операційно. Дані показують, що між квітнем 2019 року та квітнем 2024 року щорічна кількість помилкових пожежних тривог коливалася від 130 000 до 180 000, що дорівнює понад 400 щоденним інцидентам.

Вдосконалення чинних стандартів та впровадження новітніх технічних засобів для забезпечення протипожежного захисту висотних будівель у разі виникнення пожежі є актуальною проблемою. Забезпечення належного рівня протипожежного захисту висотних будівель та ефективності діяльності пожежно-рятувальних служб у процесі ліквідації пожеж та рятування людей є одним з головних пріоритетів роботи Державної служби України з надзвичайних ситуацій.

Мета роботи. Аналіз шляхів забезпечення протипожежного захисту висотних будівель, які застосовуються на території України та за кордоном, задля подальшого пошуку оптимальних, доцільних способів протипожежного захисту.

Методи дослідження. Для дослідження пожежної безпеки висотних будинків був використаний аналіз вимог нормативних документів, а також літературних джерел щодо нових підходів до вдосконалення протипожежного захисту цих будівель.

Для досягнення поставленої мети потрібно виконати такі завдання:

- проаналізувати статистику пожеж у висотних будівель різних архітектурних форм як в Україні, так і за кордоном;
- провести аналіз нормативних документів щодо забезпечення пожежної безпеки у висотних будівлях;
- провести аналіз досліджень, спрямованих на підвищення ефективності виявлення та гасіння пожеж із застосуванням новітніх технологій для висотних будівель.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Авторами [4] проведений аналіз статистичних даних в Україні щодо пожеж у висотних будинках у довоєнний період. Виявлено, що кількість пожеж впродовж 2010–2019 років у висотних будинках різного призначення з умовною висотою вище 47 м збільшилася у 2,3 рази, з них 91 % пожеж відбувся у житлових висотних будинках. За результатом аналізу розподілу пожеж за досліджуваний період встановлено, що 60,5 % випадків пожеж відбувається внаслідок необережного поводження з вогнем, 30,4 % – порушення вимог правил пожежної безпеки під час влаштування та експлуатації електроустановок, а 9,1 % – з інших причин. Дослідження причин та місць виникнення пожеж вказує на те, що найпоширенішими початковими осередками пожежі є коридори та внутрішні сходові клітки, в яких знаходяться комунікаційні шахти та системи вентиляції, при цьому спостерігається тенденція щодо щорічного зниження кількості пожеж для цих типів приміщень.

У роботі [4] встановлено, що за результатами аналізу 707 пожеж, які сталися впродовж останніх десяти років у висотних будівлях, тільки у 51 випадку (7,2 % від кількості пожеж) будинки були обладнані СПЗ (всього 93 системи), з яких 8 – автоматичними системи пожежогасіння (АСПГ); 46 – системами пожежної сигналізації (СПС); 20 – системами протидимного захисту (СПДЗ); 19 – системами централізованого пожежного

спостереження. Упродовж 2010–2019 років завдяки спрацюванню СПЗ (54,8 % від їх загальної кількості) вдалося запобігти поширенню пожеж на значну площу, забезпечити евакуацію людей та врятувати матеріальні цінності на суму понад 68,2 млн гривень. Водночас 42 системи у житлових будинках не спрацювали. Слід відзначити, що жодна з новобудов, у якій сталася пожежа, не була обладнана СПЗ. За результатом аналізу пожеж за 2010–2019 роки виявлено низку недоліків щодо дотримання вимог пожежної безпеки для забезпечення належного утримання СПЗ, якими обладнуються висотні будинки. Також встановлено, що низька ефективність впровадження системи керування пожежною безпекою об'єктів захисту та їхніми протипожежними системами призводить до відсутності систематичного обслуговування і належного утримання цих систем, що призводить до відмови спрацювання систем, відсутності можливості вчасного виявлення та гасіння пожеж на початковій стадії їх виникнення та, як наслідок, призводить до загибелі і травмування людей, а також значних матеріальних збитків.

Аналіз статистичних даних щодо пожеж у висотних житлових будинках в Україні за 2010–2019 роки свідчить про зростання кількості пожеж у 2,3 рази, більшість яких відбулась у житлових будівлях. Основними причинами займання є необережне поводження з вогнем і порушення правил експлуатації електроустановок. Виявлено низький рівень оснащення висотних житлових будівель системами протипожежного захисту (СПЗ), а також їх незадовільне технічне утримання, що значно знижує ефективність реагування на пожежі та сприяє зростанню людських і матеріальних втрат. Аналогічна ситуація спостерігається і за кордоном, зокрема у США, де більшість смертей унаслідок пожеж стається у будинках без працездатних СПЗ. Це підкреслює необхідність досліджень задля удосконалення систем протипожежного захисту у висотних будівлях.

У роботі [5] зазначають, що наявні протипожежні заходи не завжди забезпечують достатній рівень пожежної безпеки у висотних будівлях. Вони часто базуються на мінімальних стратегіях пом'якшення небезпеки та не враховують сучасні виклики, пов'язані з пожежною небезпекою. Важливим кроком для зменшення пожежної небезпеки є вдосконалення засобів протипожежного захисту, ефективне регулювання та виконання сучасних будівельних норм. Підвищення обізнаності громадськості щодо пожежної безпеки та використання сучасних технологій є також важливими аспектами в цьому контексті. Дослідження та навчання у сфері пожежної безпеки мають

включати розроблення економічно ефективних СПЗ, раціональне проєктування пожежних підходів та оцінювання нових матеріалів. Ці кроки є важливими для подальшого підвищення рівня пожежної безпеки у висотних будівлях.

Нинішній рівень протипожежних заходів у висотних житлових будівлях є недостатнім для ефективного забезпечення пожежної безпеки, оскільки він часто ґрунтується на застарілих нормативних вимогах. Для зниження пожежної небезпеки необхідно вдосконалювати системи протипожежного захисту, впроваджувати сучасні будівельні норми, підвищувати обізнаність населення та контроль за експлуатуванням, а також застосовувати новітні технології. Подальший розвиток у сфері пожежної безпеки повинен включати розроблення економічно ефективних рішень, оптимальне проєктування СПЗ.

Аналіз статистичних даних про пожежі показує, що пожежна безпека висотних будівель забезпечується на етапі проєктування, будівництва та експлуатації об'єкта.

У нормативній літературі [6–10] встановлено вимоги пожежної безпеки до житлових будинків, СПЗ, обмеження шляхів поширення пожежі, наведено класифікацію житлових будинків залежно від умовної висоти.

Зокрема, у будівельних нормах [6] встановлено загальні вимоги пожежної безпеки до житлових будинків, які спрямовані на обмеження поширення пожежі між ними, обмеження поширення пожежі всередині будинків, убезпечення евакуації людей, створення умов для гасіння пожежі та проведення рятування людей під час пожежі, а також застосування систем протипожежного захисту.

Для класифікації житлових будинків використовують умовну висоту будинку, яку визначають різницею позначок найнижчого рівня проїзду (встановлення) пожежних автодрабин (автопідйомників) і підлоги верхнього поверху без урахування верхніх технічних поверхів, якщо на технічних поверхах розміщено лише інженерні обладнання та комунікації будинку. Умовна висота житлових будинків, у яких на верхньому поверсі розташовані лише квартири у двох рівнях, визначається за позначкою нижнього рівня квартир, якщо вихід з квартир до загального коридору будинку (на сходову клітку) влаштовано лише на нижньому рівні квартир [6]. За умовною висотою житлові будинки поділяють на такі: малоповерхові – заввишки $H < 9$ м; багатоповерхові – заввишки $9 \text{ м} < H < 26,5$ м; підвищеної поверховості – заввишки $26,5 \text{ м} < H < 47$ м; висотні – заввишки $H > 47$ м.

Для проектування нових і реконструкції, капітального ремонту житлових будинків з умовною висотою до 73,5 м, включно з одноквартирними та багатоквартирними, у тому числі спеціалізованими квартирними житловими будинками для осіб літнього віку і осіб з інвалідністю, а також гуртожитками, використовують будівельні норми [7]. Під час визначення поверховості надземної частини багатоквартирного житлового будинку до кількості поверхів включають усі надземні (зокрема, мансардний), у тому числі технічні і цокольний, якщо верх його перекриття розташований вище середньої планувальної позначки землі не менше ніж на 2 м. За різної кількості поверхів у різних частинах будинку на ділянці з ухилом поверховість визначають окремо для кожної частини будинку. Технічний поверх, розташований над верхнім житловим поверхом, під час визначення поверховості будинку не враховують.

У таких будинках необхідно встановлювати СПДЗ та АСПГ згідно з правилами [7]. Вилучення диму та гарячих газоподібних продуктів згоряння з поверхових коридорів у будинках з незадимлюваними сходовими клітками слід передбачати через спеціальні шахти з примусовою витяжкою і клапанами, які влаштовуються на кожному поверсі з розрахунку одна шахта на 30 м довжини коридору. Для кожної шахти тепло- та димовидалення, згідно з вимогами [7], слід передбачати окремий вентилятор. Шахти димовидалення повинні бути з негорючих матеріалів і мати клас вогнестійкості не менше ніж EI 180 – у висотних житлових і громадських будинках для транзитних повітроводів і шахт, розташованих за межами протипожежного відсіку, що ними обслуговується, та EI 120 – для вертикальних повітроводів і шахт у межах протипожежного відсіку, що ними обслуговується, системи підпору повітря проєктують у ліфтові шахти, сходові клітки, тамбур-шлюзи і ліфтові холи житлових будинків, а відповідні системи скидання надлишкового тиску з об'ємів, що захищаються, необхідно проєктувати згідно з правилами [8].

Проектування та будівництво висотних житлових будинків з умовною висотою понад 73,5 м і до 100 м здійснюється згідно з будівельними нормами [9]. Такі висотні будівлі повинні оснащуватися СПДЗ на основі адресованих і адресовано-аналогових технічних засобів. Усі вбудовані і прибудовані до них громадські та інші нежитлові приміщення (автостоянки, допоміжні, технічні, сміттєзбірні, стовбур сміттєпроводу тощо) слід обладнувати АСПГ.

СПС і АСПГ мають відповідати [9]. СПС повинна мати ієрархічну структуру з поділом по протипожежних відсіках і забезпечувати можливість

роботи системи кожного відсіку в автономному режимі. Розміщувати пожежні сповіщувачі необхідно так, щоб кожна точка контрольованого приміщення перебувала в межах робочих радіусів двох пожежних сповіщувачів згідно з вимогами [9]. У разі пошкодження шлейфів пожежної сигналізації в одному або декількох приміщеннях (квартирах) повинен забезпечуватись зв'язок з елементами системи, які встановлені в інших приміщеннях (квартирах), шляхом відключення пошкодженої ділянки. Дозволяється використовувати кільцеві шлейфи пожежної сигналізації з відгалуженнями в кожне приміщення (квартиру) з автоматичним захистом від короткого замикання у відгалуженні.

Системи оповіщення про пожежу та керування евакуюванням людей, системи диспетчеризації та автоматизації СПЗ повинні мати блочну структуру з поділом по протипожежних відсіках і також забезпечувати можливість роботи систем кожного відсіку в автономному режимі.

У роботі [10] пропонується для убезпечення людей та майна влаштовувати у новобудовах або під час реконструкції висотних житлових будинків спринклерні системи з накопиченою водою з повною або зниженою місткістю трубопроводів від резервуару. Використання цих систем здатне вплинути на поширення пожежі і як наслідок підвищити рівень захисту висотного житлового будинку.

Нормативні вимоги до побудови СПС і АСПГ, зокрема ієрархічна та блочна структура з автономною роботою по протипожежних відсіках, є технічно обґрунтованими та спрямованими на підвищення надійності функціонування систем у надзвичайних ситуаціях. Проте на практиці ці вимоги часто не виконуються через складність реалізації, технічну недосконалість обладнання, відсутність належного контролю за проєктуванням і монтажем, а також ігнорування експлуатаційної стійкості систем у разі пошкоджень. Існує потреба у перегляді та оновленні регламентів з урахуванням сучасних технологічних можливостей, а також у запровадженні жорсткіших механізмів контролю за їх дотриманням.

Висотні будівлі повинні обладнуватися пожежними ліфтами не менше двох у будівлі або в кожній секції будівлі. Улаштування пожежних ліфтів у висотних будівлях здійснюється відповідно до вимог ДСТУ EN 81-72, ДСТУ-НБВ.2.2-38.

Необхідність обладнання житлових висотних будинків, вбудованих (прибудованих) нежитлових приміщень СПЗ, а також вимоги до цих систем формується згідно з правилами [8]. Житлові висотні будинки з умовною висотою від 26,5 м до

73,5 м повинні мати у передпокоях квартир, позаквартирних коридорах та ліфтових холах пожежні сповіщувачі спонукальної системи СПДЗ з використанням адресних компонентів. Вбудовані приміщення різного призначення слід обладнувати СПЗ незалежно від площі. У будинках з умовною висотою понад 47 м сигнали від пожежних приймально-контрольних приладів автоматичних установок пожежної сигналізації треба виводити на пульт централізованого спостереження, а приміщення будинків з умовною висотою від 73,5 м до 100 м, окрім СПДЗ, необхідно обладнувати АСПГ. Обладнання будинків висотою понад 100 м СПС та АСПГ визначається індивідуальними технічними вимогами.

Висотні житлові будинки та приміщення підлягають обладнанню системами керування евакууванням людей щодо систем оповіщення про пожежу та показників напрямку евакуування з умовною висотою від 26,5 м до 73,5 м 1-го типу, а понад 73,5–100 м – 4-го типу [9]. За даними Національної асоціації протипожежного захисту (NFPA), СПЗ можуть зменшити кількість смертельних випадків до 87 % і збиток майна до 36 %.

Наявні нормативні вимоги щодо оснащення житлових висотних будинків СПЗ деталізовано регламентують умови застосування різних систем залежно від висоти будівлі та типу приміщень, що є важливим для підвищення пожежної безпеки. Водночас недоліком є складність реалізації цих вимог на практиці через значне варіювання технічних рішень, обмеження у фінансуванні, а також недостатній контроль з боку уповноважених органів за їх виконанням. Індивідуальний підхід до обладнання будівель понад 100 м без чітких уніфікованих стандартів створює ризики суб'єктивного трактування і зниження рівня безпеки. Попри доведену ефективність СПЗ за даними NFPA, їх широке впровадження обмежується слабкою нормативною відповідальністю за невиконання.

Для запобігання поширенню пожеж у висотних будівлях передбачають комплекс заходів, спрямованих на обмеження площі, інтенсивності та тривалості горіння [7; 8]. Найбільш ефективними з них є об'ємно-планувальні заходи безпеки, як-от:

- поділ будинку по вертикалі і горизонталі на протипожежні відсіки, обмеження площі і висоти відсіків;
- обмеження висоти розташування приміщень, гасіння пожежі в яких ускладнено, а також виділення цих приміщень протипожежними перешкодами;
- обмеження кількості шахт ліфтів, що перетинають межі пожежних відсіків, а також

обмеження зв'язку з шахтами ліфтів підземних і надземних поверхів;

– поділ будівлі протипожежними перешкодами, які блокують поширення пожежі за межі приміщень, між групами приміщень різної функціональної пожежної небезпеки, між поверхами та секціями, а також між пожежними відсіками.

Розподіл висотних будівель на протипожежні відсіки по вертикалі пропонується здійснювати протипожежними перекриттями, по горизонталі – протипожежними стінами, протипожежні перекриття повинні мати клас вогнестійкості не менше REI 180 або розділятися технічним поверхом з протипожежними перекриттями класом вогнестійкості не менше REI 120. На межі протипожежних відсіків (на рівні протипожежного перекриття) слід передбачати карниз по контуру будівлі, що виступає за межі фасаду не менше ніж на 0,75 м з класом вогнестійкості не менше EI 90, або зовнішні огорожувальні конструкції (перегородки, вікна, вітражі тощо) першого поверху наступного протипожежного відсіку повинні відповідати класу вогнестійкості не менше EI 90 хв. Житлова частина будинку повинна мати самостійні виходи і бути відокремленою від приміщень іншого функціонального призначення протипожежними стінами та перекриттями. Найбільша площа надземного поверху (відсіку) між протипожежними стінами – площа протипожежного відсіку – повинна бути не більше 1500 м² (для готелів), не більше 2000 м² (для житлових приміщень), не більше 2500 м² в інших випадках. Висота кожного протипожежного відсіку надземної частини будівлі не повинна перевищувати 50 м (16 поверхів).

Під час розміщення приміщень різної функціональної пожежної небезпеки всередині пожежного відсіку та будівлі необхідно враховувати, що приміщення, розраховані на одночасне перебування більше 500 осіб, повинні відокремлюватися від інших приміщень протипожежними стінами та перекриттями, а відстань від цих приміщень до незадимлюваних сходових кліток не повинна перевищувати 20 м.

Висотні будівлі через особливості конструкцій, як зазначено у роботах [11; 12], характеризуються підвищеним рівнем пожежної небезпеки порівняно із забудовою стандартної поверховості. Пожежа у висотній будівлі створює безліч проблем і висуває особливі критерії щодо забезпечення безпеки людей. Перш за все це стосується застосування пожежних сходів, евакуації людей, особливостей формування вогнища загоряння і поширення вогню, а також складності ліквідації надзвичайних ситуацій. Такі будинки часто

стають місцем виникнення великих пожеж через їх висоту, для них характерні швидке поширення вогню по вертикалі будівлі, обмежені можливості евакуації та складність ліквідації таких пожеж. Основна проблема полягає у тому, що шляхи евакуації швидко блокуються продуктами згоряння, а це створює небезпеку під час евакуації мешканців. Дим та отруйні гази швидко заповнюють приміщення, роблячи їх непридатними для перебування людей. Щоб запобігти подібним ситуаціям, необхідно дотримуватися вимог стандартів безпеки для будівельних матеріалів, якими утеплюють стіни та оздоблюють шляхи евакуації. Також наявні недоліки у системах протипожежного захисту висотних будівель під час виявлення пожеж, евакуації та оповіщення людей, димовидалення, недостатньою є межа вогнестійкості будівельних конструкцій та інші фактори, що сприяють зростанню пожежної небезпеки. Усунення цих причин пожежної небезпеки у висотних будинках на законодавчому рівні та вдосконалення протипожежних рішень за допомогою науково-технічного прогресу допоможе зменшити кількість пожеж, матеріальних збитків та забезпечити більшу безпеку для мешканців висотних будівель.

У роботі [13] автори вказують на особливості пожежної небезпеки висотних будинків, такі як швидке поширення пожежі та диму, тривалий час евакуації, значна тривалість пожежі, змішане розташування, обмежене водопостачання, складність пожежогасіння. Дослідники рекомендують вжити конкретних заходів для підвищення пожежної безпеки висотних будинків, включно зі стратегією «захисту на місці» або поетапною евакуацією, покращенням робочих характеристик та резервуванням активних і пасивних систем протипожежного захисту, підвищенням стійкості до руйнування, розробленням технології евакуації наступного покоління (захищений/посилений ліфт, зовнішні евакуаційні пристрої, пристрої для спуску по сходах), що забезпечують надійну передачу інформації в режимі реального часу та за межі приміщення.

Ефективне керування пожежною безпекою, як вважають дослідники [13], є важливим аспектом забезпечення безпеки висотних будівель, особливо з огляду на те, що житлові приміщення належать до категорії пожежонебезпечних. Забезпечення належного рівня пожежної безпеки в житлових приміщеннях відіграє вирішальну роль у збереженні життя мешканців та захисті їхнього майна. У роботі [13] проводиться оцінка заходів протипожежного захисту задля зниження ризику виникнення пожеж. Результатом цієї праці є розроблення контрольного списку для аналізу ризиків

і заходів протипожежного захисту. Цей контрольний список включає 32 фактори, які можуть спричинити пожежу, а також 25 заходів протипожежного захисту. Така система аналізу дає можливість визначити ключові аспекти пожежної безпеки та ефективно впроваджувати заходи для запобігання пожежам та їхнім наслідкам у житлових приміщеннях. Проте запропоновані рішення можуть бути складними для широкого впровадження через високу вартість, технологічну складність та обмежену нормативну інтеграцію. Крім того, відсутність дієвого механізму практичного застосування контрольного списку на рівні експлуатації житлових будинків обмежує його ефективність як інструмента керування пожежною безпекою.

Автори у роботі [14] звертають увагу на те, що стратегія ефективної профілактики виникнення пожеж у висотних будівлях повинна будуватись на основі цілей і задач створення безпеко-орієнтованого середовища та мінімізації наслідків в разі настання надзвичайної події. У своїй роботі вони провели аналіз методів оцінювання пожежних ризиків в Україні, країнах Америки та ЄС в результаті чого виявили недосконалості у сценаріях розвитку пожеж.

В результаті проведеної роботи автори встановили, що потрібно ґрунтовніше підходити до вибору можливих сценаріїв пожеж у комплексі оцінювання пожежних ризиків. Окрім того, автори виявили недосконалість вітчизняної методики розрахунку часу початку евакуації, що суттєво впливає на остаточний розрахунок індивідуальних та соціальних ризиків в комплексі інжинірингу пожежної безпеки. Також автори запропонували розробити методології вибору необхідних сценаріїв розвитку пожеж, що відповідатимуть параметрам пожежної безпеки, та вдосконалити методики розрахунку загального часу евакуації людей з урахуванням часу її початку.

Автори [15] також розглянули концепцію оцінки безпеки мешканців у багатоповерхових житлових будинках, в основі якої лежить визначення часу, протягом якого мешканці конкретної будівлі можуть бути евакуйовані у безпечне місце до того, як виникнуть умови, несприятливі для евакуації. В результаті проведеного дослідження автори стверджують, що моделювання пожежної небезпеки у висотних житлових будинках може бути виконано точно, враховуючи параметри ASET і RSET. Однак брак ресурсів і експертів у використанні відповідного програмного забезпечення робить цей метод, заснований на продуктивності, важкодоступним.

СПЗ, призначені для виявлення, контролю та гасіння пожеж, забезпечують раннє запобігання

та дають можливість здійснити оперативну евакуацію. СПС приводять в дію АСПГ, протипожежні двері, системи димовилучення та підпору повітря тощо. За оптимальної роботи ці системи можуть рятувати життя, зменшувати кількість травм і зводити до мінімуму пошкодження майна. Дослідженню і розробленню ефективних СПЗ на основі новітніх технологій присвячено низку наукових праць [16–23].

У роботі [17] розглядається необхідність вдосконалення протипожежного захисту висотних будівель за допомогою інтелектуальних систем «Інтернету речей». Основним ключем рівня сприйняття є технологія виявлення пожеж. Від чутливості детектора залежить, чи може система «Інтернету речей» працювати коректно, об'єктивно і ефективно в разі виявлення пожеж. У наявній СПС «рівень сприйняття» в архітектурі забезпечується димовими, тепловими сповіщувачами, сповіщувачами полум'я, газовим детектором та іншими моніторинговими пристроями СПЗ. Обладнання передає інформацію про пожежу та стан роботи системи шляхом виявлення фізичних параметрів, як-от температура, дим, випромінювання полум'я та атмосферний тиск. Однак чутливість і автоматизація детекторів та іншого обладнання в традиційній СПС не можуть повністю відповідати вимогам до детекторів у системі «Інтернету речей» для пожеж. Відсутність необхідного інтелектуального аналізу та оцінки, покращення та удосконалення системи також є центром майбутніх досліджень та розробок. Дослідники [17] стверджують, що пожежну безпеку висотних будинків можна покращити всебічно, використовуючи передові технології, такі як дрони, роботи та «Інтернет речей». Водночас критичним недоліком є те, що дослідження залишається переважно теоретичним, без належної практичної апробації або прикладів ефективної інтеграції таких рішень у реальні умови експлуатації. Крім того, реалізація подібних технологій потребує значних інвестицій, кваліфікованого обслуговування та змін у нормативно-правовій базі, що наразі гальмує їх широке впровадження.

Автори [18] підкреслюють, що важливим аспектом у висотних будівлях є автоматизований процес прийняття рішення як за нормального функціонування об'єкта керування (для таких випадків розроблені алгоритми «відпрацювання»), так і під час виникнення нестандартних (надзвичайних) ситуацій. При цьому вони зазначають, що всі надзвичайні ситуації неможливо передбачити, але важливо виробити критерії, за досягнення яких втрати будуть мінімальними. За виникнення пожежі у приміщенні, охопленому

полум'ям, за наявності людей буде оптимальним один алгоритм роботи системи, що забороняє відключення вентиляції, а за їх відсутності – інший, який передбачає відключення вентиляції для швидкого гасіння пожежі. Цих заходів необхідно вжити в межах автоматизованої системи контролю зі зворотним зв'язком, враховуючи системи резервування, які б виключали так званий людський фактор.

Аналіз результатів повномасштабних випробувань СПС NIST, спільно з використанням двоетапного RTI і даних про температуру відмови під час випробувань на нагрівання, проведений дослідниками [19], показав, що час від спрацювання сигналізації до її теплової відмови можливо оцінити. Тести показали, що конструкції димових сповіщувачів забезпечують необхідні 30 хв від спрацювання до втрати чутливості або виходу з ладу, при цьому мінімальний час становить понад 2 хв. У зв'язку зі збільшенням швидкості розвитку пожеж у житлових приміщеннях через зміну меблів та оздоблювальних матеріалів виробники димових сповіщувачів повинні переглянути конструкції та матеріали своїх пожежних сповіщувачів, щоб забезпечити відповідність нормативним вимогам щодо швидкості виявлення пожежі. Також важливо, щоб звукова сигналізація продовжувала працювати протягом принаймні 30 секунд після спрацювання, перш ніж втратить свою функціональність через температурні впливи пожежі.

У роботі [19] слушно наголошується на важливості впровадження автоматизованих систем прийняття рішень з урахуванням сценаріїв як стандартних, так і надзвичайних ситуацій, що підвищує ефективність реагування систем протипожежного захисту у висотних будівлях. Дослідження також акцентує на необхідності адаптації алгоритмів до наявності людей у зоні пожежі та вдосконаленні конструкцій пожежних сповіщувачів відповідно до сучасних викликів. Однак критика полягає у відсутності конкретних технічних рішень щодо реалізації цих алгоритмів, обмежній деталізації параметрів систем резервування та слабкій увазі до можливих збоїв у зворотному зв'язку системи. Крім того, пропозиція щодо оновлення конструкцій пожежних сповіщувачів потребує узгодження з виробничими стандартами та нормативною базою, що наразі не розглянуто достатньою мірою.

Під температурним режимом пожежі автори [20] розуміють зміну температури пожежі в часі. За температуру пожежі в приміщенні приймають середньооб'ємну температуру газового середовища, в якому відбувається пожежа. Температура

пожежі в приміщенні істотно залежить від його об'єму, часу розвитку пожежі, площі пожежі, пожежного навантаження, виду горючої речовини (теплоти згоряння речовини, масової швидкості вигорання речовини, швидкості поширення горіння), інтенсивності газообміну, тепловтрат на нагрівання конструкцій, температури повітря, що надходить у приміщення. Якщо повітрообмін у приміщенні не обмежений, то інтенсивність горіння збільшується, зростає температура в зоні реакції горіння. З іншого боку, це повітря має достатньо низьку температуру, тому температура пожежі може падати. Те, який саме з цих двох факторів буде впливовішим, залежить від конкретної ситуації.

Газообмін на пожежі, як стверджують автори [20], відіграє вирішальне значення у забезпеченні безпеки людей, які перебувають всередині приміщення, і забезпеченні умов для організації і вжиття заходів для їх порятунку, гасінню пожежі. За пожежі в приміщенні, залежно від умов газообміну, на певній висоті від рівня підлоги фізичні параметри газового середовища (густина, тиск) відповідають фізичним параметрам повітря поза приміщенням. Цю площину прийнято називати нейтральною зоною або площиною рівних тисків. Визначення рівня нейтральної зони за пожежі в огороженні необхідне для організації евакуації людей, роботи особового складу в зоні задимлення з використанням індивідуальних засобів захисту.

Основними способами регулювання газообміну пожежі в приміщенні, на думку дослідників [20], можуть бути такі:

- зниження тиску у верхній частині приміщення шляхом відкачки нагрітих продуктів згоряння пересувними димовсмоктувачами і використання систем примусового вилучення диму та вентиляції;
- відкриття витяжних отворів у зоні, де створюється максимальна температура і тиск продуктів горіння (відкриваються димові та аераційні люки у верхній частині приміщення);
- зниження температури продуктів горіння, отже, їх тиску за допомогою тонкорозпиленних струменів води;
- регулювання співвідношення площі припливних і витяжних отворів: за збільшення площі витяжних отворів відбувається підвищення рівня нейтральної зони, поліпшується процес аерації приміщення, нейтральна зона завжди розташовується ближче до тих отворів, площа яких більше.

Попри теоретичну ґрунтовність, у дослідженні [20] відсутні практичні методики або моделі визначення нейтральної зони в реальних умовах

пожежі. Також не розглядається вплив складних форм архітектури приміщень на параметри газообміну та можливі труднощі точного вимірювання середньооб'ємної температури. Відсутність посилання на стандартизовані способи моделювання пожежного розвитку (наприклад, CFD-моделі) обмежує застосовність наведених висновків у проєктуванні СПЗ.

Раннє попередження про пожежу у висотних будівлях, як зазначають автори [21], є важливим засобом попередження мешканців та запобігання пожежі. У їхній роботі щодо пожеж у висотних будівлях проаналізовано причини виникнення пожеж у висотних будинках у 2019 році та узагальнено причини виникнення пожеж у висотних будівлях. Запропоновано інтелектуальну систему раннього попередження про пожежу у висотних будівлях на основі злиття багатовимірних даних. На основі фактичних даних прогнозу система, заснована на злитті багатовимірних даних, аналізується за допомогою моделювання “Matlab”, перевіряючи здійсненність і надійність створеної системи раннього попередження про пожежу. Результати досліджень мають певне орієнтовне значення для оповіщення про пожежу у висотних будівлях.

Одним з найважливіших аспектів пожежної безпеки, як вважають автори [22], є раннє виявлення пожежі. Традиційних димових пожежних сповіщувачів може бути недостатньо у багатоповерхових будинках через їх складне планування та значні розміри. Щоб подолати цю проблему, були розроблені вдосконалені системи виявлення пожежі:

- відеовиявлення полум'я та диму: ці системи використовують алгоритми відеоаналізу для виявлення полум'я та диму, вони здатні виявити пожежу ще до того, як традиційні сповіщувачі спрацюють;
- удосконалені багатоканальні сповіщувачі: ці сповіщувачі поєднують кілька сенсорів, таких як сенсорів диму, тепла та СО, щоб забезпечити комплексні можливості виявлення пожежі, вони можуть точніше відрізнити ознаки пожежі від ознак, які не пов'язані з пожежею;
- бездротові сенсорні мережі: ці мережі складаються з взаємопов'язаних сповіщувачів диму та тепла, що забезпечує моніторинг у реальному часі та миттєве сповіщення персоналу керування.

Дослідники доходять висновку, що відеосистеми виявлення полум'я та диму забезпечують раннє виявлення пожежі, що впливає на площу пожежі.

СПС для виявлення пожежі, як вважають дослідники [23], відіграють важливу роль

у запобіганні великих пожеж та зменшенні втрат, пов'язаних з пожежею. СПС можуть бути реалізовані за допомогою візуальних датчиків (відеокамер) або комбінуванням сповіщувачів, залежно від конкретного середовища та вимог. Використання відеоаналізу у виявленні пожежі дає можливість ідентифікувати візуальні ознаки, такі як дим і полум'я. Однак недоліком є те, що необхідно мати хорошу якість зображення. У роботі [23] підкреслено ефективність використання пожежних відеосповіщувачів, які використовують алгоритми виявлення загорання за допомогою різних методів визначення характеристик полум'я та диму, базуючись на спектральних, просторових або часових властивостях. Такі рішення дійсно підвищують точність і швидкість реагування систем пожежної сигналізації, особливо в умовах складної архітектури. Хоча автори слушно акцентують на перевагах новітніх технологій, вони недостатньо розглядають їхні обмеження у практичному застосуванні. Наприклад, ефективність відеоаналізу значно знижується за умов низької видимості (дим, ніч, технічні несправності камер). Крім того, в роботах бракує аналізу можливих хибних спрацювань, що можуть зменшити довіру до систем.

Автори [24–29] проаналізували роботу різних типів сповіщувачів та за допомогою моделювання спрогнозували їх роботу за різних умов експлуатування. Так, у роботі [24] аналізуються різні типи пожежних сповіщувачів: теплові, димові, мультисенсорні та пожежні сповіщувачі полум'я. Залежно від умов їх використання, перешкод, які можуть бути на об'єкті, формуються висновки щодо доцільності використання тих чи інших пожежних сповіщувачів. Враховуючи значні збитки від пожеж, час є критичним фактором виявлення пожежі. На швидкість виявлення займання пожежним сповіщувачем, окрім різних чинників, впливає те, наскільки правильно і якісно розроблено алгоритм роботи пожежних сповіщувачів. В роботах [26–28] пропонується зменшити час виявлення загорання ПС за рахунок розробок алгоритмів роботи на основі нечіткої логіки та нейронних мереж. Ці та інші дослідження, які виконують у цій галузі, необхідно враховувати під час вибору пожежних сповіщувачів для захисту приміщень у висотних будівлях.

У роботах [24–28] обґрунтовано важливість удосконалення систем пожежогасіння та виявлення пожежі у висотних житлових будинках, зокрема через впровадження спринклерних систем і вдосконалення алгоритмів роботи пожежних сповіщувачів з використанням сучасних технологій – нечіткої логіки та нейронних мереж. Такі підходи сприяють підвищенню швидкості

реагування та загального рівня безпеки. Запропоновані рішення є перспективними, в роботах недостатньо уваги приділено питанням технічної реалізації в умовах наявної інфраструктури, особливо під час реконструкції. Впровадження інтелектуальних алгоритмів вимагає значних ресурсів, тестування на надійність і кіберзахист, що автори оминають. Крім того, відсутній глибокий аналіз експлуатаційної надійності спринклерних систем у реальних сценаріях, зокрема за обмеженого водопостачання або відмови елементів.

В роботі [29] за допомогою комп'ютерного моделювання у програмному середовищі “Fire Dynamics Simulator”, яка працює на платформі інтерфейсу “PyroSim”, змодельовано температурні режими пожежі та залежності задимлення на одиницю довжини від часу в приміщенні кабінету, адміністративному приміщенні і приміщенні виробництва фанери. За допомогою нейронної мережі апроксимовано ці криві. Модель нейронної мережі була побудована та навчена в пакеті “Neural Network Start GUI” програмного середовища “MATLAB 2020a”. Отримані залежності можна використати для дослідження розвитку пожежі в приміщеннях висотних будівель. Маючи ці апроксимовані криві, можна навчити нейронну мережу розрізняти ознаки пожежі від оманливих явищ, не пов'язаних з пожежею.

На основі проведеного аналізу СПЗ у висотних будівлях можна дійти таких висновків:

- статистика пожеж у висотних будівель показала, що, незважаючи на низку наявних протипожежних заходів, ця тематика залишається актуальною для подальших досліджень;
- наявна нормативна документація щодо забезпечення пожежної безпеки у висотних будівлях неповністю враховує останні інноваційні технології;
- не розглядаються методи для визначення складових СПЗ, виходячи з конкретних умов;
- одним зі способів підвищення протипожежного захисту є використання та вдосконалення наявних СПЗ, а також розроблення інноваційних елементів систем, які забезпечать швидке і безпомилкове виявлення пожежі.

Висновки. Проведений аналіз наукових робіт з дослідження пожежної небезпеки висотних будівель та чинних стандартів показав, що для забезпечення пожежної безпеки цих будівель рекомендуються різноманітні заходи, а саме встановлення СПЗ, належне експлуатування його та іншого електротехнічного обладнання, підвищення ефективності евакуаційних заходів. Однак наведені рекомендації не забезпечують повною мірою пожежну безпеку висотних будівель, тому потребують додаткових досліджень та удосконалень.

Небезпеки, які виникають під час пожежі у висотних будівлях, спонукають до розроблення більш ефективних засобів захисту зазначених будівель від пожеж. Одним зі способів підвищення протипожежного захисту є використання та вдосконалення наявних СПЗ, а також розроблення новітніх елементів систем, які забезпечать швидке і дійсне виявлення пожежі. Особливо забезпечити надійний захист з дотриманням вимог нормативних документів можна зі впровадженням СПС з використанням аспіраційних, інтелектуальних точкових пожежних сповіщувачів та відеосповіщувачів, які використовують алгоритми виявлення загорання з різними методами визначення характеристик полум'я та диму, базуючись на спектральних, просторових або часових властивостях.

Для досягнення поставленої мети, окрім використання адресних СПС та спринклерних систем водяного пожежогасіння, якими захищаються висотні будівлі, необхідно провести низку досліджень задля визначення залежностей місць розміщення елементів СПЗ від швидкості виявлення загорання та гасіння, а також ймовірності впливу сторонніх факторів на помилкові спрацювання. Для використання сучасних інтелектуальних СПС та пожежних відеосповіщувачів необхідно вдосконалити наявні рекомендації щодо впровадження інтелектуальних СПС та розробити нові рекомендації для останніх, враховуючи те, що в Україні відсутня нормативна база щодо їх застосування, а міжнародні нормативні документи не дають вичерпних вимог до впровадження пожежного відеоспостереження для захисту об'єктів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Аналітична довідка про пожежі та їх наслідки в Україні за 9 місяців 2024 року. URL: <https://dsns.gov.ua/upload/2/2/8/5/6/0/5/analitichna-dovidka-pro-pojeji-092024.pdf>
2. Башинський О. І., Пелешко М. З., Судніцин Ю. Т. Аналіз причин пожежної небезпеки висотних будинків та будинків підвищеної поверховості міста Львів. *Пожежна безпека*. 2019. № 34. С. 10–15. DOI: 10.32447/20786662.34.2019.02
3. Troitzsch, J. H. Fires, statistics, ignition sources, and passive fire protection measures. *Journal of fire sciences*. 2016. № 34(3). Р. 171–198.
4. Одинець А. В., Балло Я. В., Голікова С. Ю., Несенюк Л. П. Аналіз стану з пожежами у висотних будинках в Україні. *Цивільний захист та пожежна безпека*. 2020. № 2(10). С. 91–102.
5. Kodur, V., Kumar, P., Rafi, M. M. Fire hazard in buildings: review, assessment and strategies for improving fire safety. *PSU Research Review*. 2019. 4.1. Р. 1–23.
6. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги: ДБН В.1.1-7:2016 [чинний від 2017-06-01]. Мінрегіонбуд України, 2017. 35 с.
7. Житлові будинки. Основні положення ДБН В.2.2-15:2019 [чинний від 01.12.2019]. Мінрегіонбуд України, 2019. 41 с.
8. ДБН В.2.2-41:2019 Висотні будівлі. Основні положення [чинний від 2020-01-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2019. 53 с.
9. Системи протипожежного захисту. Зі Зміною № 1: ДБН В.2.5-56:2014 [чинний від 13.11.2014]. Мінрегіонбуд України, 2019. 97 с.
10. Стационарні системи пожежогасіння. Автоматичні спринклерні системи для захисту об'єктів для проживання і перебування людей. Проектування, монтажування та технічне обслуговування ДСТУ EN 16925:2019 (EN 16925:2018, IDT) [чинний від 2020-01-01] ДП «УкрНДНЦ», 2019. 77 с.
11. Cowlard A., Bittern A., Abecassis-Empis C., Torero J. Fire safety design for tall buildings. *Procedia Engineering*. 2013. 62. Р. 169–181.
12. Балло Я. В., Голікова С. Ю., Сізіков О. О., Жихарев О. П., Савченко О. В., Несенюк Л. П. Вимоги пожежної безпеки до висотних громадських будівель з умовною висотою від 100 м до 150 м. *Цивільний захист та пожежна безпека*. 2021. № 2(12). С. 30–42.
13. Gautami, Chirag, Mayuri Prajapati, Ronak Khurana. Analysis of factors affecting fire safety management of residential building. *Int. Res. J. Eng. Technol.* 2020. № 7. Р. 81–87.
14. Оношко І. А., Ковалишин В. В. Аналіз методології оцінювання пожежних ризиків. *Пожежна безпека*. 2022. № 41. С. 94–102. DOI: 10.32447/20786662.41.2022.1
15. Kurniawan, T. A., Tambunan, L., Imaniar, L. N. Fire Safety Parameters of High-Rise Residential Building: A Literature Review of Performance-Based Analysis Method. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (may 2018). Chicago. DOI: 10.1088/1755-1315/152/1/012030
16. Xiuyu Liu, Hao Zhang, Qingming Zhu. Factor analysis of high-rise building fires reasons and fire protection measures. *Procedia Engineering*. 2012. № 45. Р. 643–648.
17. Song, L Z., Zhu, J., Liu, S. T., Qu, Z. J. Recent Fire Safety Design of High-Rise Buildings. *Journal of Urban Development and Management*. 2022. № 1(1). Р. 50–57. DOI: <https://doi.org/10.56578/judm010106>
18. Мельничук М. М., Шостачук А. М., Шостачук Д. М. Управління висотною будівлею як складним об'єктом. Моделі реакції системи. *Вісник ЖДТУ*. 2013. № 4(67). С. 17–21.
19. Geraldine Martin, Haavard Boehmer, Stephen M. Olenick. Thermally-Induced Failure of Smoke Alarms. *Fire Technology*. 2020. V. 56. Р. 673–692. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10694-019-00898-6>

20. Температурний режим пожежі у приміщенні. URL: <http://edu-mns.org.ua/avtomat/lessons/2/2.html>
21. Kong S., Fang X., Yang P., Yang Z., & Wang W. Research on High-rise Building Fire Early Warning System Based on Multidimensional Data Fusion. *5th International Workshop on Advances in Energy Science and Environment Engineering*. 12 May 2021 P. 1–5.
22. Ridhani M. F., Mahmudy W. F. Advancements in Fire Alarm Detection using Computer Vision and Machine Learning: A Literature Review. *Journal of Information Technology and Computer Science*. 2023. № 8.2. P. 86–97.
23. Шаповалов О. В., Вовк С. Я., Ференц Н. О., Оношко І. А., Кіндрацький Ю. Ю. Аналіз та шляхи вдосконалення систем протипожежного захисту логістичних складів. *Пожежна безпека*. 2024. № 44. С. 81–97.
24. Оношко І. А., Кушнір А. П., Вовк С. Я., Кобко В. А. Аналіз можливостей підвищення протипожежного захисту авіаційних ангарів шляхом вдосконалення високотехнологічних систем виявлення пожежі. *Пожежна безпека*. 2023. № 43. С. 99–112. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.43.2023.12>
25. Kushnir A., Kopchak B. Development of Multiband Flame Detector with Fuzzy Correction Block. *2021 IEEE XVII International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)*, Polyana, Ukraine, May 12–16, 2021, pp. 58–63. DOI: 10.1109/MEMSTECH53091.2021.9468075
26. Kushnir A., Kopchak B., Oksentyuk V. Development of Heat Detector Based on Fuzzy Logic Using Arduino Board Microcontroller. *2023 IEEE 17th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems, CADSM 2023*, Jaroslaw, Poland, 22–25 February 2023, pp. 1–5. DOI: 10.1109/CADSM58174.2023.10076536
27. Uduak Umoh, Udoinyang G. Inyang, Emmanuel E. Nyoho. Interval Type-2 Fuzzy Logic for Fire Outbreak Detection, *International Journal on Soft Computing. Artificial Intelligence and Applications (IJSCAI)*, August 2019. Vol. 8. No. 3, pp. 27–46.
28. Robert A. Sowah, Kwaku Apeadu, Francis Gatsi, Kwame O. Ampadu, and Baffour S. Mensah. Hardware Module Design and Software Implementation of Multisensor Fire Detection and Notification System Using Fuzzy Logic and Convolutional Neural Networks (CNNs). *Journal of engineering*. 2020. Article ID 3645729. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/3645729>.
29. Кушнір А. П., Копчак Б. В., Вовк С. Я. Апроксимація динамічних характеристик пожежі нейронною мережею для розробки інтелектуальних пожежних сповіщувачів з сенсорами диму та тепла. *Пожежна безпека*. 2022. № 41. С. 73–86. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.41.2022.09>

REFERENCES

1. Analitychna dovidka pro pozhezhi ta yikh naslidky v Ukraini za 9 misiatsiv 2024 roku [Analytical report on fires and their consequences in Ukraine for 9 months of 2024]. Retrieved from: <https://dsns.gov.ua/upload/2/2/8/5/6/0/5/analitychna-dovidka-pro-pojeji-092024.pdf> [in Ukrainian].
2. Bashynskiy, O. I., Peleshko, M. Z., & Sydnitsyn, T. Yu. (2019). Analiz prychyn pozhezhoyi nebezpeky vysotnykh budynkiv ta budynkiv pidvyschenoyi poverkhovosti mista L'viv. [Analysis of reasons of high-rise buildings fire hazard in Lviv]. *Fire safety*, 34, 10–15 [in Ukrainian].
3. Troitzsch, J. H. (2016). Fires, statistics, ignition sources, and passive fire protection measures. *Journal of fire sciences*. 34(3). P. 171–198.
4. Odynets, A. V., Ballo, Ya. V., Golikova, S. Yu., & Nesenyuk, L. P. (2020). Analiz stanu z pozhezhamy u vysotnykh budynkakh v Ukraini. [Analysis of the situation with fires in high-rise buildings in Ukraine]. *Civil protection and fire safety*. № 2(10), 91–102 [in Ukrainian].
5. Kodur, V., Kumar, P., & Rafi, M. M. (2019). Fire hazard in buildings: review, assessment and strategies for improving fire safety. *PSU Research Review*. 4.1. P. 1–23.
6. Pozhezhna bezpeka ob'yektiv budivnytstva. Zahal'ni vymohy [Fire safety of construction sites. General requirements]. (2017). DBN B.1.1-7:2016 from 1th June 2017. Minrehionbud Ukraine [in Ukrainian].
7. Zhytlovi budynky. Osnovni polozhennya. [Residential buildings. Basic provisions]. (2019). DBN B.2.2-15-2019 from 1th December 2019. Minrehionbud Ukraine [in Ukrainian].
8. Vysotni budivli. Osnovni polozhennya. [High-rise buildings. Basic provisions]. (2019). DBN B.2.2-41:2019 from 1th January 2019 [in Ukrainian].
9. Systemy protypozhezhnoho zakhystu. Zi Zminoyu № 1. [Fire protection systems. With Amendment No. 1]. (2019). From 13th November 2014. Minrehionbud Ukraine [in Ukrainian].
10. Statsionarni systemy pozhezhozasinnya. Avtomatychni sprynklerni systemy dlya zakhystu ob'yektiv dlya prozhyvannya i perebuvannya lyudey. Proektuvannya, montuvannya ta tekhnichne obsluhovuvannya. [Stationary fire extinguishing systems. Automatic sprinkler systems for the protection of residential and occupied facilities. Design, installation and maintenance]. (2019). DSTU EN 16925:2019 (EN 16925:2018, IDT) from 1th January 2020. “UkrNDNC” [in Ukrainian].
11. Cowlard, A., Bittern, A., Abecassis-Empis, C., & Torero, J. (2013). Fire safety design for tall buildings. *Procedia Engineering*. 62. P. 169–181.
12. Ballo, Ya. V., Holikova, S. Yu., Sizikov, O. O., Zhykharyev, O. P., Savchenko, O. V., & Nesenyuk, L. P. Vymohy pozhezhnoyi bezpeky do vysotnykh hromads'kykh budivel' z umovnoyu

vysotoyu vid 100 m do 150 m. [Fire safety requirements for high-rise public buildings with a nominal height of 100 m to 150 m.]. *Civil protection and fire safety*. № 2(12), 30–42 [in Ukrainian].

13. Gautami, Chirag, Mayuri Prajapati, & Ronak Khurana. (2020). Analysis of factors affecting fire safety management of residential building. *Int. Res. J. Eng. Technol.* 7, 81–87.

14. Onoshko, I. A., & Kovalyshyn, V. V. (2022). Analiz metodolohiyi otsynuyannya pozhezhnykh ryzykiv. [Analysis of the methodology for assessing fire risks] *Fire safety*. 1 (1), 50–57. DOI: <https://doi.org/10.56578/judm010106> [in Ukrainian].

15. Kurniawan, T. A., Tambunan, L., & Imaniar, L. N. (2018). Fire Safety Parameters of High-Rise Residential Building: A Literature Review of Performance-Based Analysis Method. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (May 2018). DOI: 10.1088/1755-1315/152/1/012030

16. Xiuyu Liu, & Hao Zhang, Qingming Zhu. (2012). Factor analysis of high-rise building fires reasons and fire protection measures. *Procedia Engineering*, 45. P. 643–648.

17. Song, L. Z., Zhu, J., Liu, S. T., Qu, Z. J. (2022). Recent Fire Safety Design of High-Rise Buildings. *Journal of Urban Development and Management*. 1 (1), 50–57. DOI: <https://doi.org/10.56578/judm010106>

18. Mel'nychuk M. M., Shostachuk A. M., Shostachuk D. M. (2013). Upravlinnya vysotnoyu budivleyu yak skladnym ob'yektom. Modeli reaktsiyi systemy. [Management of a high-rise building as a complex object. Models of system response]. *Bulletin of ZhDTU*. № 4(67), 17–21 [in Ukrainian].

19. Geraldine Martin, Haavard Boehmer, Stephen M. Olenick. (2020). Thermally-Induced Failure of Smoke Alarms. *Fire Technology*. V. 56, 673–692.

20. Temperaturnyy rezhym pozhezhi u prymishchenni. [Temperature regime of fire in the room]. Retrieved from <http://edu-mns.org.ua/avtomat/lessons/2/2.html> [in Ukrainian].

21. Kong S., Fang X., Yang P., Yang Z., & Wang W. (2021). Research on High-rise Building Fire Early Warning System Based on Multidimensional Data Fusion. 5th International Workshop on Advances in Energy Science and Environment Engineering, 12 May. P. 1–5.

22. Ridhani, M. F., & Mahmudy, W. F. (2023). Advancements in Fire Alarm Detection using Computer Vision and Machine Learning: A Literature Review. *Journal of Information Technology and Computer Science*. 8.2, 86–97.

23. Shapovalov, O. V., Vovk, S. Ya., Ferents, N. O., Onoshko, I. A., & Kindrats'kyi, Yu. Yu. (2024). Analiz ta shlyakhy vdoskonalennya system protypozhezhnoho zakhystu lohistychnykh skladiv. [Analysis and ways to improve fire protection systems of logistics warehouses]. *Fire safety*. 44, 81–97 [in Ukrainian].

24. Onoshko, I. A., Kushnir, A. P., Vovk, S. Ya., & Kobko, V. A. (2023). Analiz mozhyvostey pidvyshchennya protypozhezhnoho zakhystu aviatsiynykh anhariv shlyakhom vdoskonalennya vysokotekhnolohichnykh system vyyavleniya pozhezhi. [Analysis of the possibilities of increasing the fire protection of aircraft hangars by improving high-tech fire detection systems]. № 43, 99–112. DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.43.2023.12>

25. Kushnir, A., & Kopchak, B. (2021). Development of Multiband Flame Detector with Fuzzy Correction Block. 2021 IEEE XVII International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), Polyana, Ukraine, May 12–16, pp. 58–63. DOI: 10.1109/MEMSTECH53091.2021.9468075

26. Kushnir, A., Kopchak, B., & Oksentyuk, V. (2023). Development of Heat Detector Based on Fuzzy Logic Using Arduino Board Microcontroller. 2023 IEEE 17th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems, CADSM 2023, Jaroslav, Poland, 22–25 February, pp. 1–5. DOI: 10.1109/CADSM58174.2023.10076536

27. Uduak Umoh, Udoinyang G. Inyang, Emmanuel E. (2019). Nyoho. Interval Type-2 Fuzzy Logic for Fire Outbreak Detection, *International Journal on Soft Computing. Artificial Intelligence and Applications (IJSCAI)*, August, Vol. 8. No. 3, pp. 27–46.

28. Robert A. Sowah, Kwaku Apeadu, Francis Gatsi, & Kwame O. (2020). Ampadu, and Baffour S. Mensah. Hardware Module Design and Software Implementation of Multisensor Fire Detection and Notification System Using Fuzzy Logic and Convolutional Neural Networks (CNNs). *Journal of engineering*. Volume 2020. Article ID 3645729. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/3645729>

29. Kushnir, A. P., Kopchak, B. V., & Vovk, S. Ya. Aproksymatsiyadynamichnykhkharakterystykpozhezhi neyronnoyu merezheyu dlya rozrobky intelektual'nykh pozhezhnykh spovishchuvachiv z sensoramy dymu ta tepla. [Approximation of dynamic fire characteristics by a neural network for the development of intelligent fire detectors with smoke and heat sensors]. *Fire safety*. № 41, 73–86. DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.41.2022.09>

© С. Я. Вовк, О. В. Шаповалов, А. П. Кушнір, Н. О. Ференц

Оглядова стаття

Надійшла до редакції 27.03.2025

Прийнято до публікації 04.06.2025



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.46.2025.04>

Т. М. Войтович¹, В. В. Ковалишин¹, О. П. Войтович², І. І. Калужняк¹

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

² Головне управління ДСНС України у Львівській області,
м. Львів, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6375-6548> – Т. М. Войтович
<https://orcid.org/0000-0002-5463-0230> – В. В. Ковалишин
<https://orcid.org/0009-0007-7042-1010> – О. П. Войтович
<https://orcid.org/0009-0009-1101-1403> – І. І. Калужняк
✉ voitovych.tm@ldubgd.edu.ua

ОГЛЯД СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ КОРОЗІЙНОЇ ДІЇ ПІНОУТВОРЮВАЧІВ ТА ЇХ РОБОЧИХ РОЗЧИНІВ НА ЕЛЕМЕНТИ СИСТЕМ ПОЖЕЖОГАСІННЯ

Постановка проблеми. Проблема корозії, спричиненої водними вогнегасними речовинами, є актуальною у сфері пожежної безпеки. Під час застосування піноутворювачів у стаціонарних та автономних системах пожежогасіння металеві елементи (резервуари, трубопроводи, насадки, клапани, спринклери тощо) зазнають агресивного впливу. У численних дослідженнях показано, що за потрапляння розчинів піноутворювачів на метал унаслідок хімічних реакцій утворюються продукти корозії, які погіршують надійність обладнання і навіть можуть призводити до відмов системи.

Мета полягає в аналізі сучасних досліджень корозійної активності піноутворювачів та їх робочих розчинів на автономні та стаціонарні системи пожежогасіння, а також виявленні шляхів зменшення шкідливої дії корозії як наслідку покращення протипожежного захисту об'єктів.

Опис матеріалу. Основні методи експериментального дослідження корозійної активності піноутворювачів включають занурення сталевих пластин у робочі розчини піни з подальшим вимірюванням втрати маси. Окрім гравіметричного методу, застосовують електрохімічні дослідження, що дають змогу встановлювати потенціал корозії та густину струму корозії. Такий підхід дає змогу кількісно порівняти агресивність різних типів піноутворювачів. Зокрема, протеїнові піни (та фторпротеїнові) під час експериментів виявилися одними з найагресивніших. Загалом синтетичні піни, що містять спеціальні стабілізатори та інгібітори, демонструють нижчу корозійну активність.

Для мінімізації корозійного впливу водних вогнегасних речовин рекомендують комплексний підхід. По-перше, застосовувати стійкі до корозії матеріали, уникати незахищеного карбонового металу та цинку. Існує практика внутрішнього захисту резервуарів та корпусів вогнегасників фарбами або полімерами. По-друге, до складу самих концентратів слід вводити корозійні інгібітори. По-третє, контролювати якість води, а саме застосовувати пом'якшену або демінералізовану воду для приготування робочого розчину піноутворювача, уникати солей і забруднень, що збільшують електропровідність середовища. По-четверте, після пожежогасіння слід своєчасно очищувати системи – видаляти залишки піни та продуктів корозії.

Так, міжнародний стандарт NFPA зазначає, що концентрати протеїнових піноутворювачів повинні містити інгібітори для захисту від корозії, а компоненти системи (трубопроводи, клапани) мають виконуватись з матеріалів, сумісних з піноутворювачем (латунь, бронза, нержавіюча сталь тощо). Тоді як для синтетичних вимагає вказівки на сумісність матеріалів. Також у стандарті регламентуються умови водопостачання, а саме вода повинна бути сумісною з концентратом піни та не містити зважених домішок або солей, що спричиняють додаткову корозію.

Щодо українських стандартів, то у ДСТУ EN 1568 немає чіткої вимоги щодо маркування саме корозійних властивостей. Це питання переважно врегульовується на рівні технічної документації виробника, а не на нормативному рівні з обов'язковим маркуванням. Інший український нормативний документ ДСТУ 3789:2015 вимагає, щоб піноутворювачі загального призначення мали низьку корозійну активність.

Висновки. Сучасний досвід показує, що під час проєктування та експлуатації систем пожежога-сіння необхідно враховувати корозійний вплив речовин на її елементи, а також створювати вимоги до експлуатації систем пожежога-сіння. Результати аналізу вказують на те, що найлегшим і найдешевшим способом зменшення корозійного впливу на системи пожежога-сіння є додавання до складу піноутво-рювачів інгібіторів, що буде потребувати додаткового дослідження їхньої вогнегасної здатності. Також необхідно переглянути нормативні документи щодо запобігання корозії у системах пожежога-сіння, а саме фарбового чи полімерного захисту внутрішніх поверхонь корпусів вогнегасників.

Ключові слова: корозія, піноутворювач, інгібітор корозії, система пожежога-сіння, вогнегасник.

T. M. Voitovych¹, V. V. Kovalyshyn¹, O. P. Voitovych², I. I. Kaluzhniak¹

*¹ Lviv State University of Life Safety,
Lviv, Ukraine*

*² The Main Department of the State Emergency Service of Ukraine in the Lviv Region,
Lviv, Ukraine*

REVIEW OF CURRENT RESEARCH ON THE CORROSIVE EFFECTS OF FOAM CONCENTRATES AND THEIR WORKING SOLUTIONS ON FIRE SUPPRESSION SYSTEM COMPONENTS

Problem statement. The problem of corrosion caused by aqueous firefighting agents remains highly relevant in the field of fire safety. When foam concentrates are used in fixed and autonomous fire suppression systems, metallic components (tanks, pipelines, nozzles, valves, sprinklers, etc.) are exposed to aggressive chemical interactions. Numerous studies have demonstrated that contact between foam solutions and metal surfaces initiates chemical reactions that form corrosion products, which in turn reduce equipment reliability and may even lead to system failure.

Objective. This study aims to analyze recent research on the corrosive activity of foam concentrates and their working solutions on autonomous and fixed fire suppression systems, and to identify strategies to mitigate the harmful effects of corrosion, thereby improving the fire protection of facilities.

Description of the material. The main experimental methods for assessing the corrosive activity of foam concentrates include immersing steel plates into foam working solutions followed by measuring mass loss. In addition to the gravimetric method, electrochemical analysis is employed to determine corrosion potential and corrosion current density. This approach enables a quantitative comparison of the corrosiveness of different types of foam concentrates. Notably, protein-based foams (including fluoroprotein foams) have shown the highest levels of corrosive activity in experimental conditions. In contrast, synthetic foams that include specialized stabilizers and corrosion inhibitors generally demonstrate lower corrosive effects.

To reduce the corrosive impact of aqueous firefighting agents, a multi-faceted approach is recommended. First, corrosion-resistant materials should be used, avoiding unprotected carbon steel and zinc. It is common practice to protect the internal surfaces of tanks and fire extinguisher bodies with paints or polymer coatings. Second, corrosion inhibitors should be incorporated directly into the foam concentrate formulations. Third, water quality should be controlled by using softened or demineralized water to prepare working solutions, thereby avoiding salts and contaminants that increase electrical conductivity. Fourth, after fire suppression activities, systems should be promptly cleaned to remove residual foam and corrosion products.

The international NFPA standard states that protein-based foam concentrates must include corrosion inhibitors, and that system components (e.g., piping, valves) must be made from materials compatible with the foam concentrate, such as brass, bronze, or stainless steel. For synthetic foams, material compatibility must be explicitly stated. Additionally, the standard regulates water supply conditions: the water used must be compatible with the foam concentrate and must not contain suspended particles or salts that could accelerate corrosion.

Regarding Ukrainian standards, DSTU EN 1568 does not provide specific requirements regarding the corrosive properties of foam concentrates. This issue is mainly addressed in the manufacturer's technical documentation, rather than being officially regulated with mandatory labeling. Another Ukrainian regulatory document, DSTU 3789:2015, requires that general-purpose foam concentrates exhibit low corrosive activity.

Conclusions. Current practice indicates that the design and operation of fire suppression systems must take into account the corrosive effects of firefighting agents on system components, and operational guidelines must be defined accordingly. The analysis suggests that the most straightforward and cost-effective method of mitigating corrosion is the inclusion of corrosion inhibitors in foam concentrate formulations. However, further research is needed to evaluate the fire-extinguishing performance of such enhanced compositions. It is also necessary to revise regulatory documents concerning corrosion prevention in fire suppression systems, particularly regarding the use of protective paint or polymer coatings on the internal surfaces of fire extinguisher bodies.

Key words: corrosion, foam concentrate, corrosion inhibitor, fire suppression system, fire extinguisher.

Постановка проблеми. Корозія відома як поступове руйнування матеріалів, що призводить до втрати структурної цілісності та погіршення функціональності поверхні [1]. Корозія металів є важливою проблемою систем пожежогасіння з точки зору як тривалості зберігання вогнегасних речовин, так і надійності системи [2]. У пожежній справі вона проявляється як поступове руйнування металевих елементів систем пожежогасіння внаслідок хімічних та електрохімічних процесів взаємодії металу з довкіллям [3]. Такі процеси відбуваються в резервуарах для зберігання піни (корпусах вогнегасників), трубопроводах, спринклерах, лінійних індукторах (ежекторах), таких як трубки Вентурі, шлангових з'єднаннях, форсунках [4–7].

Деякі іноземні організації, такі як National Fire Protection Association (NFPA), Electric Power Research Institute (EPRI), FM Global та European Fire Sprinkler Network, опублікували документи та стандарти, які намагаються вирішити ці проблеми. Проте наразі не існує узгодженої стратегії ні в Україні, ні закордоном (в Національній асоціації інженерів з корозії (National Association of Corrosion Engineers (NACE), зараз – AMPPE) щодо ефективного та дієвого зменшення корозії в системах протипожежного захисту [6].

У 1995 році компанія Allied Signal у Темпі, штат Аризона, Сполучені Штати Америки, зазнала серйозного збою спринклерної системи у своєму Всесвітньому обчислювальному центрі. У трубопроводі спринклерної системи утворився витік, який призвів до зупинки всіх виробничих операцій компанії на сході США на шість годин. Ця втрата продуктивності коштувала їм 16 мільйонів доларів [8].

У системах пожежогасіння корозія найчастіше виникає через контакт сталі з водою, киснем і домішками (електролітами, брудом), що призводить до утворення іржі, обростання внутрішньої поверхні труб і звуження їх перетину. З часом це може викликати витіки, втрату напору, а також вихід з ладу спринклерів і насосів, тобто суттєво зменшувати надійність протипожежних систем.

Піноутворювачі, що застосовуються як у переносних вогнегасниках, так і в стаціонарних системах пожежогасіння, містять поверхнево-активні речовини та розчинні солі. Хоча концентрати піноутворювачів здебільшого розроблені з урахуванням екологічності, до їхнього складу часто входять хлориди, сульфати, карбонати та інші речовини, що можуть посилювати корозію металів [2]. Для захисту внутрішніх поверхонь корпусів вогнегасників застосовують полімерні чи лакофарбові покриття [9].

Традиційно багато протипожежних водопроводів та вогнегасників виготовляється з вуглецевої сталі [10]. Тим часом існує небагато сучасних експериментальних досліджень впливу піноутворювачів та їх робочих розчинів на корозію металів.

Метою роботи є аналіз останніх досліджень щодо корозійної активності піноутворювачів та їх робочих розчинів, їхнього впливу на елементи систем протипожежного захисту, а також шляхів зменшення впливу корозії у таких системах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Відомо, що корозія створює багато проблем у системах пожежогасіння, особливо у вологих та попередньо діючих пожежних спринклерах [11–19]. Науковці [6; 20–23] показали, що продукти корозії, такі як горбки та окалина, осідають на оцинкованій та вуглецевій сталі, знижуючи ефективність спринклерних систем. У роботах [6; 20] всебічно розглядаються потенційні форми корозії у системах протипожежного захисту, такі як рівномірна, гальванічна, ерозійна, точкова корозія, корозія щілин, корозія, спричинена довкіллям, міжкристалічна та мікробіологічна корозія (MIC), передчасне спрацювання спринклерів, а також руйнування труб з хлорованого полівінілхлориду. Водночас проаналізовано параметри, що призводять до корозії та/або протікання сталевих трубопроводів у системах протипожежного захисту, такі як горбки, хімічний склад води, товщина спринклерних труб, корозія зварних швів, наявність повітря (у вологих системах) та залишкової води (у сухих системах).

Як матеріал для протипожежних трубопроводів іноді використовують нержавіючу сталь, оскільки вона зазвичай має кращу корозійну стійкість, ніж залізо або вуглецева сталь. Однак іноді несподівані корозійні пошкодження в системах з нержавіючої сталі спостерігалися лише після відносно короткого часу використання (від кількох тижнів до кількох років). Більшість таких корозійних пошкоджень було виявлено на зварних швах або в зонах термічного впливу на них. Одним з найважливіших факторів, що впливають на це, є поверхневі оксидні плівки, що виникають під впливом тепла зварювання за наявності кисню [10]. Науковці [10; 24] проаналізували руйнування труб з нержавіючої сталі в системах пожежогасіння, що контактують з природною або водопровідною водою, яка містить іони хлориду, марганцю та заліза. Автори вважають, що належний захист кореня шва важливий, особливо під час зварювання труб для систем протипожежного захисту, де вода береться з природних джерел (наприклад, з річок, озер або водопроводу), оскільки мікробіологічна корозія

(МІС) може значно підвищити ризик корозійних пошкоджень.

Для оцінки корозійного руйнування широко використовують електрохімічні методи, а саме растрову електронну мікроскопію та метод енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії. Ці методи дають змогу отримати корозійний потенціал, щільність струму корозії та оцінити поляризаційний опір шару металу [2]. Також вони дають можливість охарактеризувати металеву поверхню, вкриту або вільну від продуктів корозії, та за допомогою поляризаційних кривих визначити значення корозійного потенціалу, густини корозійного струму та глибини проникнення корозії.

Науковці [25] дослідили корозію нержавіючої сталі 304 у 3 % піноутворювачі Hydral (Італія), який є вискоєфективним типом синтетичного піноутворювача AFFF. Експерименти показали тісну відповідність між даними втрати ваги та електрохімічними вимірюваннями (анодна поляризація).

У роботах [2; 9; 26] дослідження корозії здійснювали експериментально за допомогою занурення зразків металів у робочі розчини піноутворювачів і вимірювання їх корозійного ушкодження. Для оцінювання застосовували гравіметричний метод (визначали швидкість корозії за втратою маси металевих зразків певної площі). У таких експериментах визначають середню швидкість зниження маси сталевих або алюмінієвих пластин під впливом заданої концентрації розчину піноутворювача [2; 9; 26]. Поряд з гравіметричними дослідженнями використовують оптичну візуальну оцінку стану покриттів після випробувань.

Експерименти вказують на значний вплив складу піноутворювача та інгібіторів на швидкість корозії металів. Зокрема, в дослідженні [2] вимірювання втрати ваги маловуглецевої сталі та алюмінієвого сплаву (AlSiCuMg), що піддалися корозії в протейнових піноутворювачах Fomtec P 6 % (Швеція) та Profoam 806 (Італія), показали, що сплав алюмінію демонструє меншу швидкість втрати ваги, ніж вуглецева сталь. Однак загальна тенденція обох матеріалів полягає в досягненні найбільшої швидкості корозії в перший період впливу, після чого триває стаціонарний стан за тривалого занурення, протягом якого фіксувалися майже постійні швидкості корозії.

Швидкості корозії, розраховані за густиною струму корозії з використанням електрохімічними методами, добре узгоджуються з показниками, отриманими за допомогою вимірювань втрати ваги, хоча вони на порядок вищі. Науковцями у джерелі [2] також підкреслено, що різниця

в хімічному складі концентратів визначає різні корозійні властивості. Білки, що містяться в піноутворювачах, можуть сприяти комплексоутворенню катіонів металів (заліза, алюмінію) в електrolіті, тому рівномірна корозія прискорюється за їх зниженої концентрації.

Щодо дослідження різних типів піноутворювачів, то авторами [4] було виявлено, що корозійна активність стандартного протейнового піноутворювача щодо вуглецевої сталі приблизно в 13 разів вища, ніж у AFFF, тоді як нержавіюча сталь мала нульову швидкість корозії.

Корозійні властивості інших пінних вогнегасних піноутворювачів (3M FC 203 CE (AFFF, США), Angus FP 70 (фторпротейнова, Велика Британія) та National Foam XL3 (фторпротейнова, США), всі з вмістом Cl 21–38 г/л) були досліджені у роботі [5]. Випробовуючи поширені будівельні матеріали, вуглецеву сталь, нержавіючу сталь та алюмінієвий сплав, автори виявили, що швидкість корозії не була пропорційна вмісту галогенідів у вогнегасній речовині. Фторпротейновий піноутворювач Angus FP 70 виявився найбільш корозійним для вуглецевої сталі.

Також у іншій роботі було проведено дослідження сумісності металів з фторпротейновою ПАР та піноутворювачів без фтору (fluoropolymer-free foam concentrate (F3) RF Solberg) [27]. Випробування зануренням проводилися для чистих металів (алюмінію, міді), чавуну, маловуглецевих та нержавіючих сталей та сплавів (CuNi, латунь, бронза, монель, сплави магній або титану). Втрати ваги, визначені порівняно зі значеннями в дистильованій воді, показали, що вода є більш агресивною, ніж піноутворювачі або їх розчини. Такі результати пояснюють, що самі піноутворювачі часто містять інгібітори чи щільно пригнічені агресивні іони, а чиста вода без них може бути більш «активною» для корозії.

Крім США, у інших країнах було проведено небагато досліджень корозії у пожежній галузі. У роботах [7; 28; 29] описано рівномірну та локалізовану корозію вогнегасного обладнання, а також запропоновано найважливіші методи запобігання або пом'якшення корозії [2].

Описані досліди також будуть актуальними для автономних вогнегасних систем, а саме водопінних вогнегасників. Корозія в їх компонентах може призвести до зниження тиску в системі, заклинювання клапанів та інших рухомих частин або засмічення насадок продуктами корозії, що перешкоджає подачі піни. Для уникнення цих наслідків виробники використовують захисну сітку на сифонній трубці та наносять на внутрішню поверхню корпусів вогнегасників фарби

чи інші покриття, зокрема полімерні (епоксидні). У дослідженні [9] зображено, що навіть невелике порушення цілісності внутрішнього захисного покриття корпусів вогнегасників призводить до його відшарування й погіршення захисту, що може викликати блокування виходів вогнегасної речовини, як наслідок, такий вогнегасник вже не відповідатиме загальним технічним вимогам [30].

Використання інгібіторів корозії у розчинах вогнегасних речовин є надійнішим, простішим і дешевішим способом зменшення їхньої корозійної активності, ніж використання захисного покриття всередині вогнегасників [9]. Також деякі інгібітори можуть використовуватись в складі піноутворювачів як стабілізатори.

Висновки. Загальні висновки свідчать про те, що корозійна активність піноутворювачів та їх робочих розчинів з залежить від багатьох факторів. По-перше, від типу піноутворювача (протеїновий, фторпротеїновий, AFFF, синтетичний, F3 тощо), який визначає наявність у розчині агресивних компонентів (іонів хлориду, натрію, органічних кислот) або, навпаки, інгібуючих домішок. По-друге, від умов зберігання та концентрації піноутворювача у робочому розчині, який може мати різну активність після змішування з водою і у чистому вигляді. По-третє, від наявності контакту металу із залишками піни протягом тривалого часу (наприклад, у стаціонарних резервуарах або системах з малою циркуляцією), що створює умови для локального підвищення концентрації агресивних іонів, особливо за порушення захисних фарбових чи полімерних покриттів.

З урахуванням цих факторів на практиці можна вживати таких заходів для зменшення впливу корозії:

- як матеріали для систем пожежогасіння використовувати нержавіючу сталь, латунь, бронзу та уникати використання звичайної, оцинкованої сталі;

- внутрішні поверхні корпусів вогнегасників і резервуарів вкривати фарбами чи іншими захисними покриттями, зокрема полімерними (епоксидними) для бар'єру від корозії;

- до складу робочих розчинів піноутворювачів додавати інгібітори (алкілімідозоліни, карбозолін, фосфонати тощо), що знижують реактивність водного розчину з металом (експериментально показано, що такі добавки можуть зменшувати швидкість корозії, а іноді й повністю захищати поверхню металу) [2; 9];

- здійснювати контроль води шляхом використання чистої демінералізованої або пом'якшеної води для приготування робочого розчину піноутворювача, контролюючи хімічний склад води та

pH, адже нейтрально-лужний розчин є менш агресивним до металів (зазвичай pH піноутворювача вище 7);

- здійснювати регулярні перевірки з оцінки цілісності внутрішніх покриттів вогнегасників під час обслуговування, а також огляд і миття систем після роботи, що дає змогу видалити залишки піни й запобігти їх тривалому впливу.

На основі викладеного можна підсумувати, що корозійний вплив піноутворювачів та їх робочих розчинів на обладнання пожежогасіння є реальною проблемою, яку вирішують завдяки різним підходам захисту, а саме підготовці води, підбором необхідних матеріалів конструкцій, добавкам-інгібіторам і захисним покриттям.

Результати аналізу доводять, що найлегшим і найдешевішим способом зменшення корозійного впливу на системи пожежогасіння є додавання до складу піноутворювачів інгібіторів. Це буде потребувати додаткового дослідження вогнегасної здатності таких робочих розчинів піноутворювачів з добавками. Також необхідно переглянути нормативні документи задля запобігання корозії у системах пожежогасіння, а саме внутрішнього захисного покриття корпусів вогнегасників.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Foorginezhad S., Mohseni-Dargah M., Firoozirad K. та ін. Recent advances in sensing and assessment of corrosion in sewage pipelines. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021. Vol. 147. P. 192–213. DOI: 10.1016/j.psep.2020.09.009
2. Patrascu M. T., Busuioc A. D., Busuioc C. Experimental study on the corrosion of carbon steel and aluminum alloy in firefighting protein foam concentrates. *Materials*. 2021. Vol. 14. No. 23. Article No. 7259. DOI: 10.3390/ma14237259
3. Revie R. W., Uhlig H. H. Corrosion and corrosion control: An introduction to corrosion science and engineering. New Jersey: Wiley-Interscience, a John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2008.
4. Bertschy A. V., Peterson H. B. Corrosion resistance of some common metals to concentrated and 6 % solutions of light water fire-extinguishing agent. NRL Report No. 6932. Naval Research Laboratory, 1969.
5. Scheffey J. L., Wright J. A. Analysis of test criteria for specifying foam firefighting agents for aircraft rescue and firefighting: Appendix A. Report No. DOT/FAA/CT-94/04. FAA Technical Center, 1994. URL: <https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/ct94-04.pdf>
6. Su P., Fuller D. B. Corrosion and corrosion mitigation in fire protection systems. Research Technical Report No. 0003040794. FM Global, 2014. URL: <https://atossa.fr/wp-content/uploads/2024/03/FMCorrosionTechReport.pdf>
7. Radwan K., Rakowska J., Ślosorz Z. Impact of surfactants used in extinguishing agent to corrosiveness

- of firefighting equipment. In: Ali M., Platko P. (Eds.). *Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies*. CRC Press/Balkema. 2015. P. 159–164. DOI: 10.1201/b19249-31
8. Kaiser L. The growing problem of corrosion in preaction sprinkler systems. ORR Protection, 2013. URL: <https://www.orrprotection.com/mcfp/problem-of-corrosion-in-preaction-sprinkler-systems> (дата звернення: 24.05.2025).
9. Войтович Т. М., Ковалишин В. В., Войтович О. Б. Дослідження впливу карбозоліну та оксиетилідендифосфонової кислоти на корозійну активність робочих розчинів піноутворювачів. *Пожарна безпека*. 2023. № 43. С. 41–49. DOI: 10.32447/20786662.43.2023.06
10. Carpen L., Ohlgschläger T. A case study on corrosion of stainless steel in firewater mains. *Proceedings of the 6th European Stainless-Steel Conference – Science and Market*. Helsinki, Finland, 10–13 June 2008. P. 129–135.
11. Tihen, J. Corrosion inhibition of dry and pre-action fire suppression systems using nitrogen gas. St. Louis: Potter Electric Signal Company, LLC.
12. Ryan Fireprotection Inc. The solution for corrosion in a fire sprinkler system. 2014. URL: <https://www.ryanfp.com/solution-for-corrosion> (дата звернення: 24.05.2025).
13. FM Global. Corrosion in automatic sprinkler systems. In: FM Global property loss prevention data sheets 2-1. 2016. P. 1–19. URL: <https://unitedfiresystems.net/wp-content/uploads/2018/11/01-Loss-Prevention-Data-Sheet-2-1-Corrosion-in-Automatic-Sprinkler-Systems-FM-Global-Oct-20161.pdf>
14. Merwin J. Corrosion in fire sprinkler systems: Increasing your liability, increasing your costs, and shortening system life. Potter/Corrosion Solutions, 2016. P. 1–5. URL: http://www.ifma-afc.org/docs/submissions/20160718_AFC_PotterCorrosionSolutions.pdf
15. O'Connor J. Inhibiting sprinkler pipe corrosion with nitrogen generation technology. *International Fire Protection*. 2017. P. 98–100.
16. Knurek M. The problem of corrosion in metal fire sprinkler systems. *Gulf Fire*. 2017. Vol. 5. URL: <https://gulffire.com/the-problem-of-corrosion-in-metal-fire-sprinkler-systems> (дата звернення: 24.05.2025).
17. Broadley, S. Corrosion in fire sprinkler systems. St. Louis: Potter Electric Signal Company, 2017. URL: <https://www.scribd.com/document/633285794/stephen-broadley-potter-electric-signal-company-pdf>
18. Hopkins, M. An introduction to corrosion in sprinkler systems: Its identification and mitigation. Anne Arundel, MD: National Fire Sprinkler Association, 2018.
19. Quick Response Fire Supply. № 223 – Fire sprinkler system pipe material: NFPA requirements and the pros and cons of steel. QRFS, 2019. URL: <https://www.qrfs.com/blog/223-fire-sprinkler-system-pipe-material-nfpa-requirements-and-the-pros-and-cons-of-steel>
20. Su P., Doerr W. W. Fire protection sprinkler system for extremely corrosive industrial duct environments. *Process Safety Progress*. 2010. Vol. 29. No. 1. P. 70–78. DOI: 10.1002/prs.10319
21. Su P., Tatar F. W., Chivukula S., Doerr W. W. Weld seam corrosion of steel sprinkler pipe. Presented at CORROSION 2013, NACE International Conference, Orlando, FL, USA. March 2013. Paper No. 2140.
22. Su P., Fuller D. B. Steel piping material corrosion: Dry and pre-action fire protection systems. *Sprinkler Age*. 2013. Vol. 32. No. 5. P. 22–26.
23. Su P., Chivukula S., Tatar F. W., Swinnerton B. Corrosion of sprinkler piping under compressed nitrogen and air supervision. Presented at CORROSION 2015, NACE International Conference, Dallas, TX, USA. March 2015. Paper No. 5548.
24. Carpen L. Corrosion of stainless steel in fire protection systems. VTT Research Report No. VTT-R-01556-08. VTT Technical Research Centre of Finland, 2008. URL: https://publications.vtt.fi/julkaisut/luut/2008/PALOMICTutk_rap_final.pdf
25. Elahresh N., Jewilli F. Evaluation of fire extinguishing foam concentrate for 304 stainless steel. Presented at the 4th International Technology of Oil and Gas Conference (TOG 2008), Tripoli, Libya, October 2008. Paper No. TOG-78.
26. Войтович Т. М., Ковалишин В. В., Кошеленко В. В. Дослідження впливу інгібіторів корозії на корозійну активність робочих розчинів піноутворювачів. *Пожарна безпека*. 2017. № 30. С. 16–21.
27. Wood, Ramboll, COWI. The use of PFAS and fluorine-free alternatives in fire-fighting foams – Final report. European Commission DG Environment & European Chemicals Agency, 2020. URL: https://echa.europa.eu/documents/10162/28801697/pfas_flourine-free_alternatives_fire_fighting_en.pdf/d5b24e2a-d027-0168-cdd8-f723c675fa98
28. Rakowska J., Ślosorz Z. Corrosion of fire extinguishing systems and firefighting fittings. *Safety & Fire Technology*. 2011. Vol. 24. No. 2. P. 113–120.
29. Radwan K., Rakowska J., Ślosorz Z. Corrosion of firefighting equipment caused by surfactants used in extinguishing agent. In: Ali M., Platko P. (Eds.). *Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies: Proceedings of the International Conference on Engineering Sciences and Technologies (ESaT 2015)*, Tatranska Strba, High Tatras Mountains, Slovakia, 27–29 May 2015. CRC Press/Balkema, 2015. P. 159–164.
30. ДСТУ 3734-98. Вогнегасники пересувні. Загальні технічні вимоги. Київ: Держспоживстандарт України, 1998.
31. NFPA 16: Standard for the Installation of Foam-Water Sprinkler and Foam-Water Spray Systems. 2014 ed. Quincy, MA: National Fire Protection Association, 2014.
32. ДСТУ 3789-98. Піноутворювачі загального призначення для гасіння пожеж. Загальні технічні

вимоги і методи випробувань. Київ : Держспожив-стандарт України, 1998.

33. ДСТУ EN 1568:2018 (усі частини) Вогне-гасні речовини. Піноутворювачі Київ: Міністерство розвитку економіки, торгівлі та сільського госпо-дарства України, 2018.

REFERENCES

1. Foorginezhad, S., Mohseni-Dargah, M., Firoozirad, K., Aryai, V., Razmjou, A., Abbassi, R., Garaniya, V., Beheshti, A., & Asadnia, M. (2021). Recent advances in sensing and assessment of corrosion in Sewage Pipelines. *Process Safety and Environmental Protection*, 147, 192–213. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.09.009>
2. Patrascu, M. T., Busuioc, A. D., Busuioc, C., Cotarta, A., Cojocaru, A., Visan, T., & Vaireanu, D. I. (2021). Experimental study on the corrosion of carbon steel and aluminum alloy in firefighting protein foam concentrates. *Materials*, 14(23), 7259. <https://doi.org/10.3390/ma14237259>
3. Revie, R. W., & Uhlig, H. H. (2008). *Corrosion and corrosion control: An introduction to corrosion science and engineering*. Wiley-Interscience, a John Wiley & Sons, Inc., Publication.
4. Bertschy, A. V., & Peterson, H. B. (1969). *Corrosion resistance of some common metals to concentrated and 6 % solutions of light water fire-extinguishing agent* (NRL Report No. 6932). Naval Research Laboratory.
5. Scheffey, J. L., & Wright, J. A. (1994). *Analysis of test criteria for specifying foam firefighting agents for aircraft rescue and firefighting. Appendix A* (Report No. DOT/FAA/CT-94/04). FAA Technical Center. URL: <https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/ct94-04.pdf>
6. Su, P., & Fuller, D. B. (2014). *Corrosion and corrosion mitigation in fire protection systems* (Research Technical Report No. 0003040794). FM Global. URL: <https://atossa.fr/wp-content/uploads/2024/03/FMCorrosionTechReport.pdf>
7. Radwan, K., Rakowska, J., & Ślosorz, Z. (2015). Impact of surfactants used in extinguishing agent to corrosiveness of firefighting equipment, chapter 27. In M. Ali & P. Platko (Eds.). *Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies*. (pp. 159–164). <https://doi.org/10.1201/b19249-31>
8. Kaiser, L. (2013, November 11). The growing problem of corrosion in preaction sprinkler systems. ORR Protection. URL: <https://www.orrprotection.com/mcfp/problem-of-corrosion-in-preaction-sprinkler-systems> (last accessed 2025, 24 May).
9. Voitovych, T., Kovalyshyn, V., & Voitovych, O. (2023). Study of the influence of carbozoline and oxyethylidenediphosphonic acid on the corrosion activity of foam concentrate working solutions [Doslidzhennia vplyvu karbozolinu ta oksyetylydendifosfonovoi kysloty na koroziinu aktyvnist' robochykh rozchyniv pinoutvoriuvachiv]. *Fire Safety [Pozhezhna Bezpeka]*, 43, 41–49. <https://doi.org/10.32447/20786662.43.2023.06>
10. Carpen, L., & Ohligschläger, T. (2008, June 10–13). A case study on corrosion of stainless steel in firewater mains: Proceedings of the 6th European Stainless-Steel Conference – Science and Market, Helsinki, Finland, 129–135. URL: https://www.researchgate.net/profile/Leena-Carpen/publication/38288705_A_case_study_on_corrosion_of_stainless_steel_in_firewater_mains/links/542e7bfe0cf27e39fa9621d0/A-case-study-on-corrosion-of-stainless-steel-in-firewater-mains.pdf
11. Tihen, J. (n.d.). *Corrosion inhibition of dry and pre-action fire suppression systems using nitrogen gas*. St. Louis: Potter Electric Signal Company, LLC.
12. Ryan Fireprotection Inc. (2014). *The solution for corrosion in a fire sprinkler system*. URL: <https://www.ryanfp.com/solution-for-corrosion> (last accessed 2025, 24 May).
13. FM Global. (2016). *Corrosion in automatic sprinkler systems*. In *FM Global property loss prevention data sheets 2-1* (pp. 1–19). URL: <https://unitedfiresystems.net/wp-content/uploads/2018/11/01-Loss-Prevention-Data-Sheet-2-1-Corrosion-in-Automatic-Sprinkler-Systems-FM-Global-Oct-20161.pdf>
14. Merwin, J. (2016). *Corrosion in fire sprinkler systems: Increasing your liability, increasing your costs, and shortening system life* (pp. 1–5). Potter/Corrosion Solutions. URL: http://www.ifma-afc.org/docs/submissions/20160718_AFC_PotterCorrosionSolutions.pdf
15. O'Connor, J. (2017). Inhibiting sprinkler pipe corrosion with nitrogen generation technology. *International Fire Protection*, 2017, 98–100.
16. Knurek, M. (2017). The problem of corrosion in metal fire sprinkler systems. *Gulf Fire*, 5. URL: <https://gulffire.com/the-problem-of-corrosion-in-metal-fire-sprinkler-systems> (last accessed 2025, 24 May).
17. Broadley, S. (2017). *Corrosion in fire sprinkler systems*. Potter Electric Signal Company. URL: <https://www.scribd.com/document/633285794/stephen-broadley-potter-electric-signal-company-pdf>
18. Hopkins, M. (2018). *An introduction to corrosion in sprinkler systems: Its identification and mitigation*. National Fire Sprinkler Association.
19. Quick Response Fire Supply. (2019). № 223 – *Fire sprinkler system pipe material: NFPA requirements and the pros and cons of steel*. QRFS. URL: <https://www.qrfs.com/blog/223-fire-sprinkler-system-pipe-material-nfpa-requirements-and-the-pros-and-cons-of-steel> (last accessed 2025, 24 May).
20. Su, P., & Doerr, W. W. (2010). Fire protection sprinkler system for extremely corrosive industrial duct environments. *Process Safety Progress*, 29(1), 70–78. <https://doi.org/10.1002/prs.10319>
21. Su, P., Tatar, F. W., Chivukula, S., & Doerr, W. W. (2013, March). *Weld seam corrosion of steel sprinkler pipe* (Paper No. 2140). Presented at CORROSION 2013, NACE International Conference, Orlando, FL, USA.

22. Su, P., & Fuller, D. B. (2013). Steel piping material corrosion: Dry and pre-action fire protection systems. *Sprinkler Age*, 32(5), 22–26.
23. Su, P., Chivukula, S., Tatar, F. W., & Swinnerton, B. (2015, March). *Corrosion of sprinkler piping under compressed nitrogen and air supervision* (Paper No. 5548). Presented at CORROSION 2015, NACE International Conference, Dallas, TX, USA.
24. Carpen, L. (2008). *Corrosion of stainless steel in fire protection systems* (VTT Research Report No. VTT-R-01556-08). VTT Technical Research Centre of Finland. URL: https://publications.vtt.fi/julkaisut/muut/2008/PALOMIC Tutk_rap_final.pdf
25. Elahresh, N., & Jewilli, F. (2008, October). *Evaluation of fire extinguishing foam concentrate for 304 stainless steel* (Paper No. TOG-78). Presented at the 4th International Technology of Oil and Gas Conference (TOG 2008), Tripoli, Libya.
26. Voitovych, T. M., Kovalyshyn, V. V., & Koshelenko, V. V. (2017). Doslidzhennia vplyvu inhibitoriv korozii na koroziiu aktyvnist robochykh rozchyniv pinoutvoriuvachiv [Research on influence of corrosion inhibitors on corrosion activity of working solutions of foaming agents]. *Fire Safety*, 30, 16–21 [in Ukrainian].
27. Wood, Ramboll, & COWI. (2020). *The use of PFAS and fluorine-free alternatives in fire-fighting foams – Final report*. European Commission DG Environment & European Chemicals Agency. URL: https://echa.europa.eu/documents/10162/28801697/pfas_flourine-free_alternatives_fire_fighting_en.pdf/d5b24e2a-d027-0168-cdd8-f723c675fa98
28. Rakowska, J., & Ślosorz, Z. (2011). Corrosion of fire extinguishing systems and firefighting fittings. *Safety & Fire Technology*, 24(2), 113–120.
29. Radwan, K., Rakowska, J., & Ślosorz, Z. (2015, May). *Corrosion of firefighting equipment caused by surfactants used in extinguishing agent*. In M. Al Ali & P. Platko (Eds.), *Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies: Proceedings of the International Conference on Engineering Sciences and Technologies (ESaT 2015)* (pp. 159–164). CRC Press/Balkema.
30. DSTU 3734-98 Vohnehasnyky peresuvni. Zahalni tekhnichni vymohy [State Standard of Ukraine 3734-98 Fire equipment. Mobile fire extinguishers. General technical requirements] (1998). URL: online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page.html?id_doc=48549 [in Ukrainian].
31. NFPA 16: *Standard for the Installation of Foam-Water Sprinkler and Foam-Water Spray Systems* (2014 Edition) (2014). National Fire Protection Association.
32. DSTU 3789-98 Pinoutvoriuvachi zahal'noho przyznachennia dlia hasinnia pozhezh. Zahal'ni tekhnichni vymohy i metody vyprobuvan' [General-purpose foam concentrates for fire extinguishing. General technical requirements and test methods]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy [in Ukrainian].
33. DSTU EN 1568:2018 (all parts) Vohnehasni rehovyny. Pinoutvoriuvachi [Fire extinguishing agents – Foam concentrates]. Kyiv, Ukraine: Ministry for Development of Economy, Trade and Agriculture of Ukraine [in Ukrainian].

© Т. М. Войтович, В. В. Ковалишин, О. П. Войтович, І. І. Калужняк

Оглядова стаття

Надійшла до редакції 19.04.2025

Прийнято до публікації 04.06.2025



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.46.2025.05>

Н. В. Жезло-Хлевна, О. В. Хлевной, Ю. С. Назар, Ю. О. Борзов, В. Й. Довбняк
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
м. Львів, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3768-2863> – Жезло-Хлевна Н. В.

<https://orcid.org/0000-0003-2846-3480> – Хлевной О. В.

<https://orcid.org/0000-0003-0151-8285> – Назар Ю. С.

<https://orcid.org/0009-0008-7971-9873> – Довбняк В. Й.

✉ line.point82@gmail.com

ЕВАКУАЦІЯ ОСІБ ІЗ МОДУЛЬНИМИ ПРОТЕЗАМИ НИЖНІХ КІНЦІВОК ПРИ ПОЖЕЖІ: СУЧАСНИЙ СТАН, ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Проблема. Війна в Україні призвела до значного збільшення кількості осіб з ампутаціями нижніх кінцівок. Ця категорія населення стикається з додатковими труднощами під час евакуації з будівель під час пожеж чи інших надзвичайних ситуацій. Основними викликами є зниження швидкості руху, нестабільність через втрату рівноваги, а також обмеження функціональних можливостей, пов'язаних з різними типами протезів. Відсутність у науковій літературі та практичних підходах до організації евакуації релевантних досліджень, що враховують мобільність осіб з протезами в критичних умовах, є актуальною проблемою, що потребує оперативного вирішення.

Метою статті є аналіз досліджень щодо впливу протезів нижніх кінцівок на мобільність і швидкість евакуації в разі пожежі та виявлення ключових факторів, що впливають на її ефективність, а також визначення перспективних напрямів подальших наукових розвідок, спрямованих на покращення евакуаційних стратегій для маломобільних груп населення.

Методи досліджень. У роботі застосовано систематичний підхід до аналізу літератури, що охоплює наукові публікації, нормативні акти та звіти з реабілітаційної практики. Для уточнення практичних аспектів мобільності проведено консультації з реабілітологами та користувачами протезів. Виконано порівняння характеристик різних типів протезів та їх впливу на швидкість руху.

Результати. Визначено, що рівень ампутації та тип протеза є ключовими факторами, які впливають на швидкість евакуації в разі пожежі. Для осіб з ампутацією стопи швидкість руху не зазнає істотних змін (максимальне зменшення швидкості не перевищує 20 %), тоді як за ампутації стегна або вичленення в тазостегновому суглобі втрати швидкості під час руху сходами можуть досягати 50–70 %. Протези з біонічними компонентами демонструють значно кращі результати в умовах евакуації завдяки адаптивності до змін рельєфу й темпу руху. При цьому моделювання евакуації осіб з протезами суттєво ускладнено через відсутність адаптованих моделей мобільності в програмному забезпеченні.

Висновки. За результатами проведеного аналізу визначено три ключові напрями вдосконалення евакуаційних стратегій, а саме проведення експериментальних досліджень для оцінки швидкості та витривалості осіб з протезами залежно від типу протезу та евакуаційного шляху; деталізація індивідуальних і потокових моделей руху учасників евакуації з протезами для інтеграції в програмні комплекси моделювання; створення рекомендацій для проєктування евакуаційних маршрутів з урахуванням потреб осіб з протезами для забезпечення безбар'єрності.

Ключові слова: евакуація, протези нижніх кінцівок, реабілітація, мобільність, пожежна безпека, комп'ютерне моделювання.

EVACUATION OF PEOPLE WITH MODULAR LOWER LIMB PROSTHESES IN THE EVENT OF A FIRE: CURRENT STATUS, PROBLEMS AND RESEARCH PROSPECTS

Problem. The war in Ukraine has led to a significant increase in the number of people with lower limb amputations. This category of the population faces additional difficulties when evacuating buildings during fires or other emergencies. The main challenges are slower walking speed, instability due to loss of balance, and limited functional capabilities associated with different types of prostheses. The lack of relevant research in the scientific literature and practical approaches to the organization of evacuation that takes into account the mobility of people with prostheses in critical conditions is an urgent problem that needs to be addressed promptly.

The purpose of the article is to analyze studies on the impact of lower limb prostheses on the mobility and speed of evacuation in case of fire and to identify key factors affecting its effectiveness, as well as to identify promising areas for further research aimed at improving evacuation strategies for people with limited mobility.

Research methods. The paper uses a systematic approach to analyzing the literature, including scientific publications, regulations, and reports on rehabilitation practice. To clarify the practical aspects of mobility, consultations were held with rehabilitation specialists and prosthesis users. The characteristics of different types of prostheses and their impact on movement speed were compared.

Results. It has been determined that the level of amputation and the type of prosthesis are the key factors that affect the speed of evacuation in a fire. For people with foot amputation, the speed of movement does not undergo significant changes (the maximum speed reduction does not exceed 20 %), while in case of hip amputation or hip disarticulation, the loss of speed while moving up the stairs can reach 50–70 %. Prostheses with bionic components demonstrate significantly better results in evacuation conditions due to their adaptability to changes in terrain and pace of movement. At the same time, modeling the evacuation of persons with prostheses is significantly complicated due to the lack of adapted mobility models in the software.

Conclusions. Based on the results of the analysis, three key areas for improving evacuation strategies have been identified: conducting experimental studies to assess the speed and endurance of persons with prostheses depending on the type of prosthesis and evacuation route; developing individual and flow models of movement of evacuees with prostheses for integration into simulation software systems; creating recommendations for designing evacuation routes taking into account the needs of persons with prostheses to ensure barrier-free access.

Key words: evacuation, lower limb prostheses, rehabilitation, mobility, fire safety, computer modeling.

Постановка проблеми. Через повномасштабну війну десятки тисяч українців – не лише військових, але й цивільних, зокрема дітей, – втратили кінцівки. Їх точна кількість невідома, проте ще у липні 2023 року видання “The Wall Street Journal” писало про 50 тисяч українців з ампутацією рук чи ніг. За даними Мінсоцполітики, лише до червня 2023 року по допоміжні засоби реабілітації звернулися 58 852 людини, з них протезували 20 737 осіб [1]. У січні-травні 2024 року протезами верхніх та нижніх кінцівок було забезпечено 5 248 осіб. Частка протезів нижніх кінцівок становить близько 55 % від загальної кількості [2]. Таким чином, в умовах повномасштабної війни кількість людей, що користується протезами, щороку зростає в середньому на 10 тисяч. І цей процес не припиниться одразу після завершення бойових дій, адже від моменту втрати кінцівки до протезування минає кілька місяців.

Сьогодні число осіб з протезами нижніх кінцівок як серед військових, так і серед цивільного населення, продовжує зростати. Статистика

свідчить про те, що більшість – люди віком від 25 до 35 років, які, попри важкі травми, продовжують вести активне життя. Цьому сприяють інноваційні досягнення в галузі протезування, що дають змогу відновлювати функціональну мобільність. Перед державою постає чимало викликів, кінцевою метою яких є перебудова інфраструктури та її максимальна доступність для людей з інвалідністю.

Одним з таких викликів є забезпечення безпеки цієї категорії населення під час евакуації в умовах надзвичайних ситуацій та пожеж. Евакуація є важливою складовою частиною заходів безпеки, а її успішність залежить від низки факторів, серед яких особливу роль відіграють фізичні можливості учасників евакуації. Люди з протезами нижніх кінцівок часто стикаються з додатковими труднощами, а саме зменшенням швидкості руху, труднощами пересування сходами, потребою в опорі чи допомозі, а також підвищеним ризиком втрати рівноваги чи травматизації. Крім того, стресові фактори та особливості конструкції

протезів можуть впливати на здатність швидко та ефективно реагувати на екстремальні ситуації.

Незважаючи на зростаючу актуальність цієї проблеми, сучасні дослідження евакуаційних процесів здебільшого зосереджені на аналізі загальної динаміки натовпу або окремих категорій маломобільних груп населення (пересування з використанням опор або крісел колісних). При цьому вплив використання протезів нижніх кінцівок на швидкість евакуації та загальну ефективність евакуаційних заходів досліджено недостатньо. Це створює значні прогалини у розробленні евакуаційних стратегій, які б враховували потреби цієї категорії населення.

Водночас сучасні системи моделювання евакуації, зокрема PyroSim, Pathfinder, здебільшого базуються на універсальних параметрах руху, що не враховують особливості мобільності людей з протезами. Відсутність реалістичних даних і сценаріїв для моделювання може призводити до недооцінки ризиків і, відповідно, недостатньо ефективного проектування шляхів евакуації.

Таким чином, виникає необхідність комплексного вивчення цієї проблеми, що включає аналіз фізичних, психологічних та технічних аспектів, які впливають на процес евакуації людей з протезами нижніх кінцівок. Проведення таких досліджень не лише допоможе краще зрозуміти потреби цієї групи населення, але й дасть змогу розробити ефективні рекомендації для вдосконалення евакуаційних стратегій і стандартів безпеки.

Аналіз досліджень і публікацій. У сфері евакуаційних досліджень усі роботи умовно можна розділити на три основні напрями.

1) Дослідження параметрів руху представників маломобільних груп населення. Вони спрямовані на вивчення швидкості та інтенсивності руху учасників евакуації на різних видах евакуаційних шляхів. Зокрема, найчастіше розглядають пересування горизонтальними ділянками, рух сходами вгору або вниз та проходження дверних прорізів. Більшість досліджень, присвячених мобільності людей з протезами нижніх кінцівок і спрямованих на вивчення їхньої здатності до пересування в різних умовах, має переважно медичне або спортивне спрямування. Так, у роботі [3] запропоновано метод оцінки швидкості пересування людей з трансфеморальною ампутацією за допомогою інерційного вимірювального пристрою (IMU), вбудованого у протез. Попри високу точність експериментальних результатів, варто відзначити обмеженість застосування методу в реальних умовах евакуації, оскільки дослідження проводилося на біговій доріжці, що не враховує складності руху в натовпі, на нерівних поверхнях або

за умов стресу під час пожежі. Крім того, метод орієнтований на оцінку рівномірної ходи, а не на специфічні аспекти евакуації, такі як маневрування або взаємодія з перешкодами. У джерелі [4] проаналізовано вплив жорсткості та висоти протезів та швидкості бігу на біомеханіку спортсменів з двосторонніми ампутаціями нижніх кінцівок. В експериментальних дослідженнях було задіяно 5 учасників.

2) Моделювання процесів евакуації змішаних потоків. Дослідження за цим напрямом дають змогу врахувати особливості евакуації під час пожежі з будівель і споруд різного призначення, зокрема присутність у складі евакуаційних потоків учасників евакуації зі зниженою мобільністю. Так, у джерелах [5; 6] проаналізовано загальні особливості евакуації маломобільних груп населення в разі пожежі. Зокрема, згадано одно- та двонаправлений рух з використанням опор та колісних крісел. При цьому в умовах експерименту поведінку учасників зі зниженою мобільністю було імітовано. Рух на протезах нижніх кінцівок не розглядався у зв'язку з технічною складністю (неможливістю) імітації. У джерелах [7–8] розглянуто часткові випадки організованого руху змішаних потоків з різним відсотковим складом учасників евакуації груп мобільності М2, М3 та М4. У цих роботах також відбувалась імітація руху маломобільних груп населення учасниками експериментів з числа добровольців. Учасники евакуації з протезами нижніх кінцівок при цьому також не розглядалися.

3) Нормування евакуаційних шляхів і виходів з урахуванням особливостей евакуації та розроблення ефективних стратегій безпеки. Цей напрям передбачає обґрунтування вимог до об'ємно-планувальних та технічних рішень у будівлях різного призначення, спрямованих на оптимізацію фізичної безбар'єрності. У джерелі [9] представлено обґрунтування параметрів використання ліфтів для евакуації маломобільних груп населення. У роботі [10] подібні дослідження проведені для евакуаційних крісел. Дослідження, представлені у праці [11], демонструють переваги і недоліки стратегій евакуації осіб з вадами опорно-рухового апарату з висотних будівель. Робота [12] присвячена питанням евакуації маломобільних груп населення із закладів освіти з інклюзивним навчанням. Попри те, що за результатами аналізу в більшості робіт учасники евакуації з протезами нижніх та верхніх кінцівок не були задіяні в експериментальних дослідженнях, специфічні пропозиції для осіб з протезами у контексті евакуації та безбар'єрного доступу часто не виділяються як окремі вимоги у нормативних документах.

Загалом за результатами аналізу літературних джерел можна дійти висновку, що сучасні дослідження істотно розширили розуміння евакуаційних процесів, проте під час урахування специфічних потреб людей з протезами нижніх кінцівок залишається **низка не вирішених проблем**, перелік яких наведено нижче.

1) Недостатньо вивчений вплив протезів на швидкість евакуації. Сучасні дослідження здебільшого орієнтовані на загальні аспекти мобільності людей з протезами у стандартних умовах. Однак динаміка руху таких осіб в умовах впливу небезпечних факторів пожежі (задимлення, обмежена видимість тощо) та перепон (сходи, вузькі проходи, скупчення людей) залишається недостатньо вивченою. Не існує систематизованих даних про те, як тип протезу (механічний, біонічний), рівень ампутації чи досвід використання впливає на швидкість і безпеку евакуації.

2) Відсутність реалістичних моделей поведінки людей з протезами у програмних комплексах. Чинні стандарти та програмні засоби моделювання наразі не враховують специфічних параметрів руху людей з протезами нижніх кінцівок. У програмних комплексах відсутні стандартні налаштування для таких користувачів, тому для симуляції необхідно самостійно налаштовувати персоналізовані характеристики їхніх профілів, зокрема швидкість та можливості маневрування. Це може призводити до значних похибок у прогнозуванні евакуаційних сценаріїв та плануванні безпечних шляхів евакуації.

3) Недосліджені взаємодії у натовпі. Люди з протезами нижніх кінцівок не можуть не тільки рухатися повільніше, але й потребувати більше простору для маневрів. Взаємодія між людьми з протезами нижніх кінцівок та іншими учасниками евакуації досліджена поверхово або недосліджена взагалі.

4) Нестача рекомендацій для проєктування евакуаційних маршрутів і заходів безпеки. Хоча існують загальні рекомендації щодо доступності будівель, вони здебільшого спрямовані на людей, які користуються колісними кріслами, опорами або іншими допоміжними засобами. Відсутні спеціалізовані норми й стандарти, які б враховували потреби осіб з протезами в умовах евакуації.

Метою роботи є аналіз сучасного стану досліджень впливу параметрів протезів нижніх кінцівок на швидкість та особливості евакуації під час пожеж чи інших надзвичайних ситуацій для виявлення прогалин у знаннях і визначення напрямів подальших досліджень.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

– провести огляд наукових публікацій, присвячених мобільності осіб з протезами та їх впливу на евакуаційні процеси;

– дослідити основні види та параметри протезів нижніх кінцівок та їх вплив на швидкість руху в процесі евакуації;

– запропонувати перспективні напрями досліджень і рекомендації для вдосконалення евакуаційних стратегій та стандартів безпеки.

Методи дослідження. У рамках підготовки оглядової статті було застосовано систематичний підхід до аналізу наукової літератури, що охоплює питання мобільності людей, які використовують протези нижніх кінцівок, моделювання евакуаційних процесів та особливостей евакуації осіб з протезами нижніх кінцівок. Пошук джерел здійснювався в базах даних “Scopus”, “Web of Science” та “Google Scholar” із застосуванням ключових слів, пов’язаних з темою дослідження. Задля забезпечення актуальності даних аналіз охоплював роботи, опубліковані переважно з 2010 до 2025 року.

Публікації відбиралися за релевантністю до тематики, зокрема щодо фізичних і психологічних аспектів мобільності осіб з протезами в умовах евакуації, а також впливу цих факторів на динаміку руху в натовпі. Особлива увага приділялася дослідженням, які використовували імітаційне моделювання. Зібрані дані були проаналізовані для визначення ключових тенденцій, виявлення прогалин у знаннях і формулювання рекомендацій для майбутніх досліджень.

Як доповнення аналізу наукових публікацій у дослідженні було використано емпіричний підхід, що передбачав спілкування з реабілітологами та особами, які використовують протези нижніх кінцівок. У ході консультацій з фахівцями були отримані оціночні дані про тривалість реабілітаційного періоду для користувачів різних типів протезів, зокрема трансфеморальних і трансгомількових. Крім того, обговорення з особами, які мають досвід використання протезів нижніх кінцівок, дало змогу оцінити їхню середню швидкість руху в умовах евакуації та можливі труднощі під час руху.

Ці дані були використані для порівняння з параметрами, які використовуються для моделювання процесів евакуації та наведені у чинних нормативних документах [13; 14], а також для формулювання практичних рекомендацій щодо вдосконалення евакуаційних стратегій і забезпечення безпеки осіб з протезами під час надзвичайних ситуацій.

Результати дослідження. Існують різні рівні ампутації нижніх кінцівок, і кожен з них вимагає

різного часу для реабілітації та відновлення. Розглянемо поширені випадки рівнів ампутації нижніх кінцівок, зокрема:

- ампутація стопи;
- ампутація гомілки;
- ампутація стегна;
- вичленення в гомілковостопному суглобі;
- вичленення в колінному суглобі;
- вичленення в тазостегновому суглобі.

Мобільність людини значно змінюється залежно від рівня ампутації. З юридичної точки зору це поняття у протезуванні визначено відповідно до джерела [15]. Цей документ затверджує порядок оцінки функціональних можливостей осіб з порушеннями функцій нижніх кінцівок, у тому числі дітей та осіб з інвалідністю. У ньому встановлено п'ять ступенів функціональних можливостей, які спрощено називають мобільністю. Вони поділяються на рівні від 0 до 4. Нульовий ступінь мобільності не передбачає можливості протезування, яке можливе лише починаючи з першого ступеня. **Перший ступінь (значні обмеження)** відповідає ситуації, коли людина може пересуватися в приміщенні за допомогою протеза та додаткової опори. **Другий ступінь (помірні обмеження)** передбачає необмежену мобільність у приміщенні та обмежену – поза ним. **Третій ступінь (легкі обмеження)** означає необмежену здатність до пересування як у приміщенні, так і у відкритому просторі. **Четвертий ступінь мобільності (відсутність обмежень)** характеризується здатністю до пересування без додаткової опори поза приміщенням, навіть за підвищених вимог до фізичної активності. Ступінь мобільності безпосередньо впливає на функціональність протезно-ортопедичних виробів, що використовуються. Чим вищий ступінь мобільності, тим



Рис. 1. Модульні протези нижніх кінцівок [16]: а) стопи; б) гомілки; в) стегна; г) стегна з 4-ланковим вузлом; д) стегна з корсетом

складніші та функціональніші комплектуючі, такі як колінні вузли або штучні стопи, можуть бути встановлені на протез.

Як вже було сказано, кожен з видів ампутації потребує різних протезів нижніх кінцівок (рис. 1). Загалом модульні протези умовно можна поділити на три основних типи: ті, які мають колінний шарнір та гомілковостопний шарнір (для ампутацій на рівні стегна або вичленення в тазостегновому суглобі), ті, які мають лише гомілковостопний шарнір (найчастіше – для ампутацій гомілки чи стопи), а також ті, які не мають шарнірних суглобів (переважно – для ампутацій частин стопи).

Шарнірні суглоби повинні витримувати значні навантаження та забезпечувати достатню свободу рухів для різних активностей, тому їх наявність дуже важлива і впливає на тривалість реабілітації та післяреабілітаційну швидкість руху.

Колінні шарнірні вузли, залежно від функціоналу та можливостей пацієнта, поділяють на моноцентричні (одновісні) та поліцентричні



Рис. 2. Шарніри колінних вузлів [16]: а) 4 рівень мобільності; б) 3 рівень мобільності; в) 2 рівень мобільності

(багатовісні), з замком або без нього. Вид колінного вузла (рис. 2) дає змогу налаштувати кут і силу згинання, а також інші параметри, залежно від потреб користувача.

Штучні стопи застосовуються для створення модульних протезів стопи, гомілки та стегна. Основними факторами, що враховуються під час вибору штучної стопи, є вага пацієнта, рівень його мобільності, тип ампутації та спосіб життя. Конструктивно штучні стопи поділяються на три основні типи (рис. 3): шарнірні, безшарнірні та енергозберігаючі (виготовлені з карбону).

Окрім шарнірів, на швидкість руху можуть впливати такі фактори, як дизайн приймальної гільзи, який дає змогу компенсувати тиск на дистальну частину кульг, а також наявність або відсутність амортизаційних систем чи механізмів (рис. 5), що адаптуються до швидкості руху.

Гільзи для протезів нижніх кінцівок відрізняються за матеріалами, формою, способом фіксації та рівнем ампутації, для якого вони призначені. Силіконові гільзи виготовляються з м'яких, еластичних матеріалів, що забезпечують щільне прилягання до кульг, зменшують тертя та підвищують комфорт, тому їх використання сприяє стабільній ході й швидкій евакуації. Шкіряні гільзи є жорсткішими, забезпечують нижчий рівень комфорту і можуть обмежувати швидкість руху через подразнення або складність фіксації, особливо в разі тривалої активності. Термопластичні гільзи

завдяки індивідуальному формуванню забезпечують точну посадку, що покращує стабільність і сприяє більш природному руху під час евакуації. Комбіновані гільзи поєднують легкість і міцність, що позитивно впливає на мобільність і швидкість пересування в умовах надзвичайної ситуації.

Способи фіксації також мають значний вплив на швидкість евакуації. Ремінцеві гільзи, хоча прості у використанні, через свою менш надійну фіксацію можуть уповільнювати рух. Вакуумні гільзи створюють надійну посадку кульг, що забезпечує стабільність і дає змогу підтримувати постійну швидкість навіть на нерівних поверхнях. Лайнерні гільзи завдяки м'яким чохлам знижують ризик травмування кульг під час евакуації, забезпечуючи комфорт і впевненість у русі. Замкові гільзи, які фіксують кульг найбільш надійно, дають змогу уникнути ковзання протеза, що особливо важливо за швидкого пересування чи на сходах. Загалом вибір гільзи має безпосередній вплив на мобільність користувача і його здатність до швидкої евакуації в умовах небезпеки [18].

Розглядаючи протези нижніх кінцівок, неможливо не згадати біонічні протези – це високотехнологічні пристрої, оснащені мікропроцесорами, сенсорами та двигунами, які автоматично адаптуються до рухів користувача і типу поверхні. Вони забезпечують природніший рух, покращують баланс і знижують енерговитрати під час ходьби. Перевагами таких протезів є висока



Рис. 3. Штучні стопи [16]: а) безшарнірні для 1 і 2 рівнів мобільності; б) шарнірні для 2 і 3 рівнів мобільності; в) енергозберігаючі для 3 і 4 рівнів мобільності

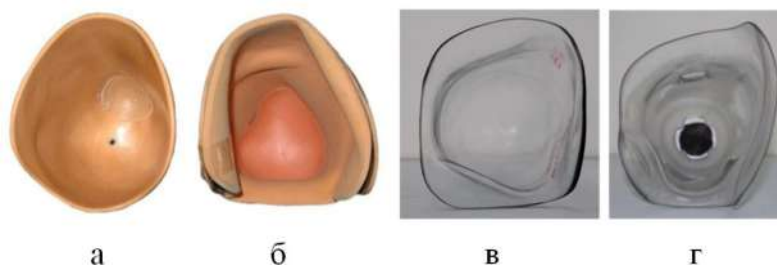


Рис. 4. Види гільз протезів нижніх кінцівок [17]: а) вакуумна приймальна гільза протезу стегна з тотальним контактом всією поверхнею; б) приймальна гільза протезу стегна з глибокою посадкою та опорою на власну зв'язку надколінка; в) поперечно-овальна приймальна гільза протезу стегна; г) гільза протезу стегна із захватом сідничної кістки



Рис. 5. Приклади амортизаційних механізмів протезів нижніх кінцівок: а) карбонова стопа з вертикальними амортизаторами; б) колінний вузол з гідравлічним амортизатором

функціональність, комфорт і можливість використання у складних умовах. Недоліки – висока вартість, залежність від джерел живлення та потреба у тривалому налаштуванні.

Не меншої уваги заслуговують спортивні протези. Вони створені для активної фізичної діяльності, такої як біг, стрибки чи заняття спортом. Їх зазвичай виготовляють з легких матеріалів, найчастіше карбону, і вони мають спеціальну форму (наприклад, леза) для підвищення амортизації та ефективності руху. Особливостями є мала вага, висока міцність і можливість досягнення високих швидкостей. Однак їхні недоліки – вузька спеціалізація і висока вартість – дуже обмежують їх повсякденне використання.

І біонічні, і спортивні протези забезпечують кращі рухові активності порівняно з іншими видами, однак під час дослідження процесів евакуації варто зазначити, що з огляду на високу ціну в умовах функціонування об'єктів різного призначення частка людей з такими процесами буде дуже низькою.

На основі аналізу літературних джерел [19–21] та консультацій реабілітологів розглянемо

найбільш поширені варіанти ампутацій нижніх кінцівок та проаналізуємо потенційну втрату швидкості руху для учасників, які користуються модульними протезами, що є важливим показником під час евакуації.

Рівень ампутації суттєво впливає на швидкість руху як на горизонтальних ділянках, так і на сходах. Для людей без ампутації базова швидкість становить 100 метрів на хвилину, тоді як для різних рівнів ампутації, залежно від виду протезу, зниження швидкості після реабілітації становитиме:

- ампутація стопи – 0–10 %;
- ампутація гомілки – 0–20 %;
- ампутація стегна – 10–35 %;
- вичленення гомілковостопного суглоба – 0–20 %;
- вичленення колінного суглоба – 10–30 %;
- вичленення тазостегнового суглоба – 25–50 %.

Як бачимо, найменше зниження швидкості спостерігається під час ампутації стопи завдяки ефективним протезам, таким як силіконові накладки, а найбільше – за вичленення тазостегнового суглоба через складність компенсації втрати великих суглобів і м'язів, необхідних для стабільності та руху.

Таким чином, можна приблизно спрогнозувати час, необхідний для подолання 100 м особами з різними видами модульних протезів нижніх кінцівок (рис. 6).

За спуску сходами показники швидкості, ймовірно, будуть гіршими через підвищені вимоги до координації, балансу та сили, які ускладнені для осіб з протезами. Спуск сходами вимагає активного контролю над згинанням суглобів і амортизацією, що особливо проблематично під час вичленення суглобів (наприклад, колінного чи

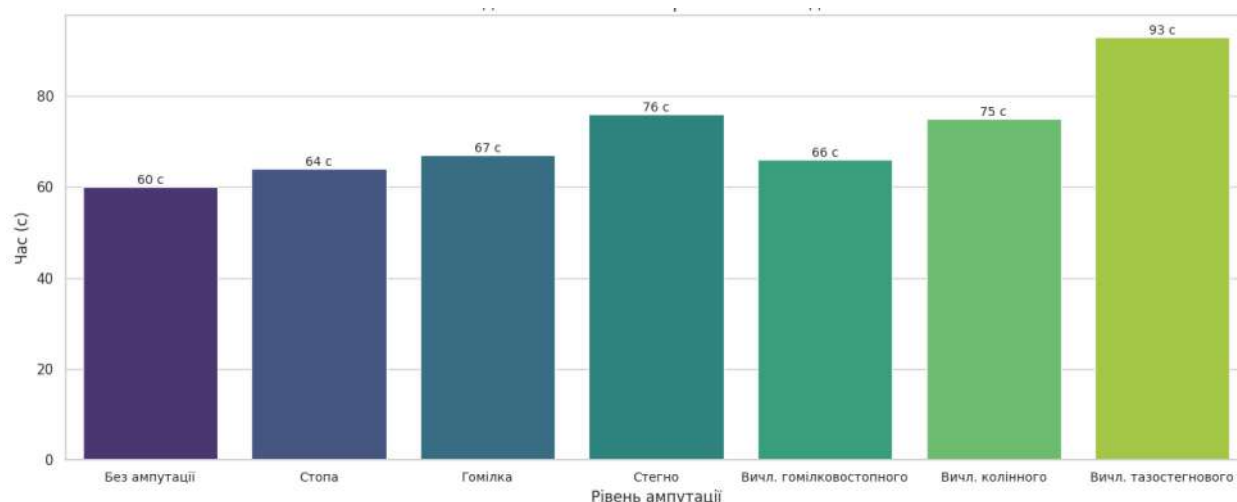


Рис. 6. Прогнозований час подолання 100 м для учасників евакуації з різними рівнями ампутації на модульних протезах

тазостегнового), де протези менш ефективно імітують природну біомеханіку.

Аналіз додаткових факторів, що впливають на рух осіб із протезами нижніх кінцівок. Окрім зменшення швидкості руху, особи з протезами нижніх кінцівок стикаються з низкою додаткових факторів, які ускладнюють їхню мобільність, як-от погана маневреність, вразливість до поштовхів, небезпека мокрих поверхонь та швидка втома. Ці аспекти впливають на безпеку, ефективність та комфорт під час пересування, особливо в складних умовах, таких як спуск сходами чи пересування нерівними поверхнями. Кожен з цих факторів залежить від рівня ампутації, типу протеза та індивідуальних особливостей користувача.

Погана маневреність є значною проблемою, особливо для осіб з ампутаціями на рівні стегна чи вичленення суглобів. Протези, особливо модульні одновісні чи з корсетом, обмежують бічні рухи та швидко зміню напрямку через недостатню гнучкість або відсутність активного контролю над суглобами. Наприклад, в разі ампутації стопи силіконові накладки забезпечують мінімальну маневреність, тоді як біонічні протези на рівні гомілки чи стегна можуть частково компенсувати це завдяки адаптивним механізмам. Однак навіть біонічні протези не повністю відтворюють природну координацію, що ускладнює повороти чи маневри на нерівних поверхнях.

Вразливість до поштовхів посилює ризик падіння, особливо за вичленення колінного чи тазостегнового суглобів. Протези на цих рівнях часто мають обмежену амортизацію та стабільність, що робить користувачів вразливими до нерівностей або зовнішніх впливів (наприклад, поштовхів у натовпі). Для ампутації стопи чи гомілки протези з амортизаторами чи регульованою стопою зменшують цю вразливість, але

не усувають її повністю. Спуск сходами донизу ускладнює ситуацію, оскільки поштовхи можуть порушити баланс, особливо на мокрих чи слизьких поверхнях.

Небезпека мокрих поверхонь становить серйозну загрозу для всіх рівнів ампутації, оскільки більшість протезів не має достатнього зчеплення з поверхнею. Наприклад, протези стопи зі спеціальним взуттям чи модульні протези гомілки можуть ковзати на вологих сходах, що підвищує ризик падіння. Біонічні протези з адаптивними стопами дещо краще справляються з такими умовами, але їхня ефективність залежить від технології та якості матеріалів. За вичленення тазостегнового суглоба небезпека зростає через обмежену здатність швидко реагувати на втрату рівноваги.

Швидка втома є ще одним критичним фактором, який залежить від рівня ампутації та типу протеза. Використання протезів, особливо на вищих рівнях (стегно, вичленення суглобів), вимагає значно більше енергії через необхідність компенсувати втрату м'язів і суглобів. Наприклад, протез із корсетом за вичленення тазостегнового суглоба може викликати втому швидше, ніж силіконові накладки в разі ампутації стопи, через більшу вагу та складність керування. Спуск сходами ще більше посилює втому, оскільки потребує додаткових зусиль для збереження балансу та контролю над протезом.

Ці фактори разом створюють комплексні виклики для осіб з ампутаціями, особливо в динамічних або непередбачуваних умовах, та може додатково зменшувати швидкість руху осіб з ампутаціями нижніх кінцівок (рис. 7).

Для вирішення описаних проблем під час планування будівель і споруд варто вживати заходів, орієнтовний перелік яких наведено у табл. 1.

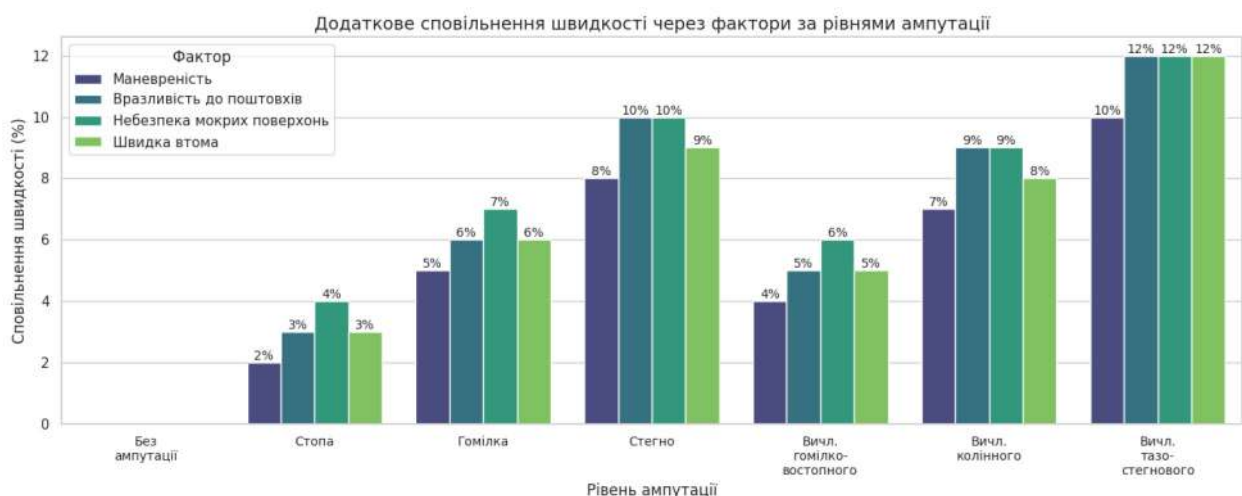


Рис. 7. Додаткове зниження швидкості через особливі умови евакуації

Взаємозв'язок проблем евакуації осіб з протезами нижніх кінцівок та запропонованих рішень

Проблема	Рішення	Очікуваний ефект
Зниження швидкості на сходах	Ліфти з резервним живленням або пандуси (нахил 1:12, ширина 1.2 м)	Підвищення швидкості; зменшення затримок у натовпі, скорочення відстані, яку потрібно подолати
Втома через високі енерговитрати та вагу протезів	Зони безпеки (2 м ² на особу, вогнестійкість EI 60)	Зниження енерговитрат під час руху пандусами, можливість відпочинку після кожних 100 м
Ризик падіння від поштовху в натовпі	Широкі евакуаційні шляхи (понад 1,2 м) та навчання персоналу для супроводу	Зменшення затримок, зниження ризику та кількості поштовхів
Ризик падіння через послизнення	Неслизькі поверхні	Знижує ризик падінь, підвищує швидкість у вологих умовах

Запропоновані рішення спрямовані на підвищення безпеки та комфорту осіб з протезами нижніх кінцівок, однак для визначення числових показників їхньої ефективності, таких як відсоток зменшення часу пересування чи зниження ризику падінь, необхідні подальші експериментальні дослідження. Вони мають включати тестування в реальних умовах із залученням користувачів протезів, щоб кількісно оцінити вплив заходів на маневреність, стабільність та енерговитрати.

Висновки. У роботі було проведено детальний аналіз нормативних документів та наукових публікацій, присвячених мобільності осіб з протезами та їхньому впливу на евакуаційні процеси. Встановлено, що відсутність інтегрованого підходу до вивчення впливу протезів на евакуаційні процеси обмежує можливості ефективного планування та підвищення рівня безпеки цієї категорії населення. Вирішення цих питань потребує міждисциплінарного підходу, що включає експериментальні дослідження, розроблення нових моделей та алгоритмів для програмного моделювання, а також удосконалення нормативної бази.

Визначено, що бойові дії, які тривають на території України понад 10 років, спричинили істотне зростання частки населення, яка використовує протези нижніх кінцівок, а також суттєві відмінності у вікових, гендерних та фізіологічних особливостях цієї групи осіб. Так, наприклад, у країнах Європи переважна частка ампутацій зумовлена природними причинами. За даними медичної статистики, ампутації нижніх кінцівок через діабет, судинні захворювання й травми зустрічаються у 0,1–0,2 % загального населення. В Україні станом на початок 2025 року за оціночними даними ця частка становить приблизно 0,35–0,45 %. У країнах Європи середній вік особи, яка використовує протез нижньої кінцівки, коливається у діапазоні 55–65 років, а частка осіб чоловічої статі становить трохи більше 60 %. В Україні ж ці показники суттєво відрізняються:

середній вік становить близько 40 років, а частка чоловіків перебуває у діапазоні 80–90 %. При цьому в Україні у значно більшого відсотка серед загальної кількості осіб з протезами спостерігаються ампутації високого рівня – від колінного суглобу і вище, тоді як переважна кількість ампутацій в країнах Європи – це ампутації стопи. З цієї причини більшість методів і моделей, які застосовуються для дослідження проблем евакуації під час пожежі осіб з протезами нижніх кінцівок, не може забезпечити адекватних результатів в наших реаліях.

У роботі також було досліджено основні види та параметри протезів нижніх кінцівок, а також їх вплив на швидкість руху в процесі евакуації. Встановлено, що, залежно від рівня ампутації та виду протезу, після завершення реабілітаційного періоду зменшення швидкості руху може становити від 0 % (ампутація частини стопи, рух на рівних горизонтальних ділянках) до 70 % (вичленення тазостегнового суглобу, рух сходами), тобто швидкість вільного руху (за відсутності зовнішніх перешкод) може коливатися в межах 50–100 м/с на рівних ділянках, 40–90 м/с під час руху сходами вниз і 20–50 м/с під час руху сходами вгору. Ці дані не збігаються з показниками, наведеними у чинних нормативних документах, що регламентують методики розрахунку тривалості евакуації. Так, наприклад, згідно з джерелом [16], усі особи, що використовують протези нижніх кінцівок, входять до групи мобільності M2. До цієї групи також входять немінні люди, мобільність яких знижена через старіння організму, особи з інвалідністю з порушеннями зору, які користуються білою тростиною, та люди з психічними відхиленнями. Для цієї групи швидкість руху за відсутності зовнішніх перешкод рекомендується приймати такою: 30 м/с – для руху горизонтальними ділянками, 30 м/с – для руху сходами вниз, 20 м/с – для руху сходами вгору відповідно. Очевидно, що ці дані далекі від

реальності і не дають змоги виконати розрахунки з належною точністю.

Виходячи з проведеного аналізу, сформуvalи перспективні напрями досліджень і рекомендації для вдосконалення евакуаційних стратегій та стандартів безпеки.

Першим з цих напрямів є експериментальне дослідження з оцінювання граничної швидкості руху та витривалості осіб з різними типами протезів у різних умовах. Очевидно, що з моменту встановлення протезу впродовж адаптаційного та реабілітаційного періодів швидкість ходи зростатиме, прямуючи до певного сталого значення. Отже, доцільно дослідити такі показники, як тривалість цього періоду та її залежність від виду протезу й типу евакуаційного шляху (горизонтальна ділянка, сходи, пандус тощо), а також відхилення кінцевої швидкості від швидкості учасників евакуації, які не користуються протезами.

Наступним кроком є деталізація індивідуальних та поточкових моделей руху учасників евакуації з протезами для використання у програмних комплексах моделювання. Загалом ці моделі повинні дозволяти враховувати залежність швидкості руху змішаних потоків, до складу яких входять учасники евакуації на протезах нижніх кінцівок, від щільності потоку та від частки учасників евакуації на протезах у потоці. Такі дані дадуть змогу виконувати розрахунки тривалості евакуації під час пожежі для різних об'єктів, що є необхідною умовою визначення індивідуальних пожежних ризиків.

Результати розрахунків тривалості евакуації під час пожежі для різних об'єктів дадуть змогу забезпечити створення рекомендацій для проєктування евакуаційних маршрутів з урахуванням потреб людей з протезами, що, як вже було зазначено на початку цієї роботи, є одним з важливих завдань держави на шляху до забезпечення безбар'єрності.

Таким чином, результати оглядового дослідження висвітлюють ключові виклики та можливості для подальшого розвитку у сфері забезпечення безпеки евакуації осіб з фізичними обмеженнями.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Черг для військових на протезування сьогодні немає. Як працює система допомоги тим, хто втратив кінцівки. URL: <https://glavcom.ua/interviews/cherhi-dlja-vijskovikh-na-protezuvannja-sohodni-nemaje-jak-pratsjuje-sistema-dopomohi-tim-khto-vtrativ-kintsivki-1010816.html> (дата звернення: 15.03.2025).
2. Суполова К., Баркасі Д. Значення реабілітації у пацієнтів з двосторонньою трансфеморальною ампутацією. *Україна. Здоров'я нації*. 2022. № 3. С. 93–96. DOI: <https://doi.org/10.24144/2077-6594.3.1.2022.266038>
3. Dauriac, B., Bonnet, X., Pillet, H., & Lavaste, F. (2019). Estimation of the walking speed of individuals with transfemoral amputation from a single prosthetic shank-mounted IMU. *Journal of Engineering in Medicine*, 233(9), 931–937. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954411919858468>
4. Beck, O. N., Taboga, P., & Grabowski, A. M. (2017). How do prosthetic stiffness, height and running speed affect the biomechanics of athletes with bilateral transtibial amputations? *Journal of the Royal Society Interface*, 14(131), 20170230. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsif.2017.0230>
5. Fu, L., Qin, H., Shi, Q., Zhang, Y., & Shi, Y. (2022). An experimental study on evacuation dynamics including individuals with simulated disabilities. *Safety Science*, 155, 105878. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105878>
6. Hostetter, H., & Naser, M.Z. (2022). Characterizing Disability in Fire Evacuation: A Progressive Review. *Journal of Safety Science and Resilience*. DOI: 10.1016/j.ssci.2022.06.004
7. Burak, N., Khlevnoi, O., Zhezlo-Khlevna, N., Raita, D., Dotsenko, O. (2025). Determination of Fire Evacuation Parameters in Higher Education Institutions with Inclusive Groups Using Machine Learning Methods. In: Babichev, S., Lytvynenko, V. (eds) *Lecture Notes in Data Engineering, Computational Intelligence, and Decision-Making*. Vol. 2. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-88483-2_14
8. Khlevnoi, O., Dotsenko, O., Kovalyshyn, V., Parkhomenko, V.-P., Dyven, V., Borysova, A., Vovk, S. (2024). Improvement of the methodology for determining the movement parameters of individuals with visual impairments during evacuation from higher education institutions with inclusive education using a simplified analytical model. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(3(128)), 60–69. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.302950>
9. Szénay, M., & Lopusniak, M. (2018). Movement parameters of persons with disabilities on evacuation by lifts. *Proceedings of the 9th International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics (PED2018)*, Lund, Sweden, August 21–23, 2018, 181–188.
10. Szulc, Karolina & Cisek, Marcin & Król, Małgorzata. (2022). Evaluation of the Evacuation of People with Disabilities, Using an Evacuation Chair. Research Report. *Safety & Fire Technology*. 60. 42–59. DOI: 10.12845/sft.60.2.2022.2
11. Koo, Jeongin & Kim, Yong Seog & Kim, Byung-In & Christensen, Keith. (2013). A comparative study of evacuation strategies for people with disabilities in high-rise building evacuation. *Expert Systems with Applications*. 40. 408–417. DOI: 10.1016/j.eswa.2012.07.017
12. Хлевной О., Харишин Д., Назаровець О. Проблемні питання розрахунку часу евакуації при пожежах у закладах дошкільної та середньої освіти

з інклюзивними групами. *Пожежна безпека*. 2020. № 29. С. 72–76. DOI: 10.32447/20784643.26.2022.05

13. ДСТУ 8828:2019. Пожежна безпека. Загальні положення [чинний від 2020-01-01]. Вид. офіц. Київ, 2018. 163 с.

14. ДБН В.2.2-40:2018. Інклюзивність будівель і споруд [чинний від 2019-04-01]. Вид. офіц. Київ, 2017. 70 с.

15. Про затвердження Порядків визначення функціональних можливостей особи з інвалідністю, дитини з інвалідністю, іншої особи: Наказ Міністерства соціальної політики України від 20 січня 2015 року № 37.

16. ДСТУ EN ISO 9999:2024 Засоби допоміжні. Класифікація та термінологія (EN ISO 9999:2022, IDT; ISO 9999:2022, IDT).

17. Гільзи та системи кріплення протезів нижніх кінцівок. URL: <https://langs.physio-pedia.com/uk/lower-limb-prosthetic-sockets-and-suspension-systems-uk> (дата звернення: 15.03.2025).

18. Семінська Н., Мусієнко О., Слободянюк І., Белевець К., Степанова А., Шитікова Н. Виготовлення протезів нижніх кінцівок: виклики, аналіз та можливі рішення. *Біомедична інженерія і технологія*. 2024. Т. 14. С. 8–17. DOI: 10.20535/2617-8974.2024.14.303997

19. De Pauw, K., Serrien, B., Baeyens, J.-P., Cherelle, P., De Bock, S., Ghillebert, J., Bailey, S.P., Lefebvre, D., Roelands, B., Vanderborcht, B., & Meeusen, R. (2020). Prosthetic gait of unilateral lower-limb amputees with current and novel prostheses: A pilot study. *Clinical Biomechanics*, 71, 59–67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2019.10.028>

20. Prost, V., Johnson, W. B., Kent, J. A., & others. (2022). Biomechanical evaluation over level ground walking of user-specific prosthetic feet designed using the lower leg trajectory error framework. *Scientific Reports*, 12, 5306. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09114-y>

21. Toderita, Diana & Favier, Clément & Henson, David & Vardakastani, Vasiliki & Sherman, Kate & Bennett, Alexander & Bull, Anthony. (2023). Hip joint and muscle loading for persons with bilateral transfemoral/through-knee amputations: biomechanical differences between full-length articulated and foreshortened non-articulated prostheses. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 20. 10.1186/s12984-023-01296-4

REFERENCES

1. Glavcom. (2024, December 21). *There are no queues for military prosthetics. How the state is helping those who have lost limbs*. <https://glavcom.ua/interviews/cherhi-dlja-vijskovikh-na-protezu-vannja-sohodni-nemaje-jak-pratsjuje-sistema-dopomohi-tim-khto-vtrativ-kintsivki-1010816.html>

2. Supolova, K., & Barkasi, D. (2022). Vazhlyvist reabilitatsii u patsientiv z dvobichnoiu transfemoralnoiu amputatsieiu [The importance of rehabilitation in patients with bilateral transfemoral amputation].

Ukraina. *Zdorovia natsii*, (3), 93–96. <https://doi.org/10.24144/2077-6594.3.1.2022.266038>

3. Dauriac, B., Bonnet, X., Pillet, H., & Lavaste, F. (2019). Estimation of the walking speed of individuals with transfemoral amputation from a single prosthetic shank-mounted IMU. *Journal of Engineering in Medicine*, 233(9), 931–937. <https://doi.org/10.1177/0954411919858468>

4. Beck, O. N., Taboga, P., & Grabowski, A. M. (2017). How do prosthetic stiffness, height and running speed affect the biomechanics of athletes with bilateral transtibial amputations? *Journal of the Royal Society Interface*, 14(131), 20170230. <https://doi.org/10.1098/rsif.2017.0230>

5. Fu, L., Qin, H., Shi, Q., Zhang, Y., & Shi, Y. (2022). An experimental study on evacuation dynamics including individuals with simulated disabilities. *Safety Science*, 155, 105878. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105878>

6. Hostetter, H., & Naser, M. Z. (2022). Characterizing Disability in Fire Evacuation: A Progressive Review. *Journal of Safety Science and Resilience*. DOI: 10.1016/j.ssci.2022.06.004

7. Burak, N., Khlevnoi, O., Zhezlo-Khlevna, N., Raita, D., Dotsenko, O. (2025). Determination of Fire Evacuation Parameters in Higher Education Institutions with Inclusive Groups Using Machine Learning Methods. In: Babichev, S., Lytvynenko, V. (eds) *Lecture Notes in Data Engineering, Computational Intelligence, and Decision-Making*, Volume 2. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-88483-2_14

8. Khlevnoi, O., Dotsenko, O., Kovalyshyn, V., Parkhomenko, V.-P., Dyven, V., Borysova, A., Vovk, S. (2024). Improvement of the methodology for determining the movement parameters of individuals with visual impairments during evacuation from higher education institutions with inclusive education using a simplified analytical model. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(3(128)), 60–69. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.302950>

9. Szénay, M., & Lopusniak, M. (2018). Movement parameters of persons with disabilities on evacuation by lifts. *Proceedings of the 9th International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics (PED2018)*, Lund, Sweden, August 21–23, 2018, 181–188.

10. Szulc, Karolina & Cisek, Marcin & Król, Małgorzata. (2022). Evaluation of the Evacuation of People with Disabilities, Using an Evacuation Chair. Research Report. *Safety & Fire Technology*. 60. 42–59. 10.12845/sft.60.2.2022.2

11. Koo, Jeongin & Kim, Yong Seog & Kim, Byung-In & Christensen, Keith. (2013). A comparative study of evacuation strategies for people with disabilities in high-rise building evacuation. *Expert Systems with Applications*. 40. 408 DOI: 417. 10.1016/j.eswa.2012.07.017

12. Khlevnoi, O., Kharyshyn, D., & Nazarovets, O. (2020). Problemni pytannia rozrakhunku chasu evakuatsii pry pozhezhakh u zakladakh doshkilnoi ta serednoi osvity z inkliuzyvnyimi hrupamy [Problems

of calculating the time of evacuation in case of fires in preschool and secondary education institutions with inclusive groups]. *Fire Safety*, 29, 136–141. <https://doi.org/10.32447/20786662.37.2020.11>

13. Derzhavnyi standart Ukrainy. (2018). *Pozhezhna bezpeka. Zahalni polozhennia [Fire Safety. General Provisions]*. (Chynnyi vid 2020-01-01) [Valid from 2020-01-01]. Kyiv: Ofitsiine vydannia. 163 s. [in Ukrainian].

14. Derzhavni budivelni normy V.2.2-40:2018. (2017). *Inklyuzyvnist budiveli i sporud [Inclusiveness of Buildings and Structures]*. (Chynnyi vid 2019-04-01) [Valid from 2019-04-01]. Kyiv : Ofitsiine vydannia. 70 s. [in Ukrainian].

15. Ministerstvo sotsialnoi polityky Ukrainy. (2015, sichen 20). *Nakaz № 37 “Pro zatverdzhennia Poriadkiv vyznachennia funktsionalnykh mozhlyvostei osoby z invalidnistiu, dytyny z invalidnistiu, inshoi osoby” [Order No. 37 “On Approval of the Procedures for Determining the Functional Capabilities of a Person with a Disability, a Child with a Disability, or Another Person”]*. [in Ukrainian].

16. DSTU EN ISO 9999:2024. (2024). *Zasoby dopomizhni. Klasyfikatsiia ta terminolohiia (EN ISO 9999:2022, IDT; ISO 9999:2022, IDT) [Assistive Products. Classification and Terminology]*. [in Ukrainian].

17. Hilzy ta systemy kriplennia proteziv nyzhnikh kintsivok [Lower Limb Prosthetic Sockets and Suspension Systems]. Retrieved from <https://langs.physio-pedia.com/uk/lower-limb-prosthetic-sockets-and-suspension-systems-uk> (accessed: 15.03.2025). [in Ukrainian].

18. Seminska, N., Musiienko, O., Slobodianiuk, I., Belevets, K., Stepanova, A., & Shytikova, N. (2024). Vyhotovlennia proteziv nyzhnikh kintsivok: vyklyky, analiz ta mozhlyvi rishennia [Manufacturing of Lower Limb Prostheses: Challenges, Analysis and Possible Solutions]. *Biomedychna inzheneriia i tekhnolohiia – Biomedical Engineering and Technology*, 14, 8–17. <https://doi.org/10.20535/2617-8974.2024.14.303997>. [in Ukrainian].

19. De Pauw, K., Serrien, B., Baeyens, J.-P., Cherelle, P., De Bock, S., Ghillebert, J., Bailey, S. P., Lefeber, D., Roelands, B., Vanderborght, B., & Meeusen, R. (2020). Prosthetic gait of unilateral lower-limb amputees with current and novel prostheses: A pilot study. *Clinical Biomechanics*, 71, 59–67. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2019.10.028>

20. Prost, V., Johnson, W. B., Kent, J. A., & others. (2022). Biomechanical evaluation over level ground walking of user-specific prosthetic feet designed using the lower leg trajectory error framework. *Scientific Reports*, 12, 5306. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09114-y>

21. Toderita, Diana & Favier, Clément & Henson, David & Vardakastani, Vasiliki & Sherman, Kate & Bennett, Alexander & Bull, Anthony. (2023). Hip joint and muscle loading for persons with bilateral transfemoral/through-knee amputations: biomechanical differences between full-length articulated and foreshortened non-articulated prostheses. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 20. 10.1186/s12984-023-01296-4

© Н. В. Жезло-Хлевна, О. В. Хлевой, Ю. С. Назар, Ю. О. Борзов, В. Й. Довбняк

Оглядова стаття

Надійшла до редакції 30.04.2025

Прийнято до публікації 04.06.2025



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.46.2025.06>

О. І. Лавренюк, Б. М. Михалічко

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4509-2896> – О. І. Лавренюк

<https://orcid.org/0000-0002-5583-9992> – Б. М. Михалічко



Olav@ukr.net

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ГОРЮЧОСТІ ЕПОКСІАМІННИХ КОМПОЗИЦІЙ

Вступ. Найпоширенішим і найефективнішим методом зниження горючості полімерних матеріалів є використання антипіренів. Сьогодні особливо популярними є хімічно активні антипірени, тоді як застосування інертних антипіренів поступово скорочується. Реакційноздатні антипірени містять функціональні групи, тому можуть взаємодіяти з мономерами під час синтезу полімерів або з макромолекулами вже сформованих полімерів. Завдяки цьому їх можна використовувати не лише як мономери під час створення полімерів, але й як модифікатори або зшивачі агенти. Пошук нових антипіренів і розроблення нових рецептур полімерних матеріалів зі зниженою горючістю зазвичай здійснюються емпірично, базуючись лише на залежності властивостей матеріалу від його складу. Особливості впливу антипірену на будову отриманих матеріалів майже не враховуються.

Мета. Термохімічне моделювання горючості епоксіамінних композицій на підставі їх будови та перевірка адекватності запропонованої моделі шляхом експериментальних досліджень.

Методи. Купрум(II)-амінний комплекс та епоксіамінні композиції отримували прямою взаємодією відповідних компонентів. Математичне моделювання антипіренового впливу купрум(II)-амінного комплексу на горючість модифікованої епоксіамінної композиції проводили на основі значень енергій хімічних зв'язків, які виникають у комплексі. Горючість композицій оцінювали за теплою згоряння ($Q_{\text{зг}}$, кДж/кг), яку обчислювали за законом Гесса. Горючість епоксіамінних композицій визначали експериментально за ДСТУ 8829:2019 (п. 7.3).

Результати. Згенеровано кластерні фрагменти немодифікованої епоксіамінної композиції (ЕД/*пера*) та композиції з вмістом запропонованого антипірена-затвердника (ЕД/ $\{[\text{Cu}(\text{deta})\text{H}_2\text{O}]\text{SO}_4\}_2$), що дало змогу змодельовати термохімічну поведінку композицій під час горіння. Проведено термохімічні обчислення реакції горіння епоксіамінних композицій. Виявлено, що значення ентальпії утворення модифікованої епоксіамінної композиції порівняно з немодифікованою суттєво нижче. Таку закономірність можна пояснити протіканням процесів комплексоутворення між сіллю купруму(II) та *пера* в процесі структурування модифікованої епоксіамінної композиції. Завдяки появі додаткових координаційних зв'язків $\text{Cu(II)}-\text{N}$ виділяється енергія. Це відображається у горючості епоксіамінних композицій, що було доведено шляхом обчислення теплоти згоряння епоксіамінних композицій та експериментального визначення їх горючості.

Висновки. На підставі будови епоксіамінних композицій проведено математичне моделювання їх показників горючості. Завдяки здійсненим обчисленням було встановлено причину антипіренової дії купрум(II)-амінного комплексу, сутність якої полягає в утворенні додаткових хімічних зв'язків $\text{Cu}-\text{N}$, відповідальних за зниження горючості модифікованих епоксіамінних композицій. Результати математичного моделювання корелюють з результатами проведених експериментальних досліджень, а саме під час введення в епоксіамінну композицію хелатного купрум(II)-амінного комплексу покращуються всі показники, за якими оцінюють горючість.

Ключові слова: квантово-хімічне моделювання, енергія хімічних зв'язків, епоксіамінні композиції, купрум(II)-амінні комплекси, антипірени, горючість.

EXPERIMENTAL STUDY AND MATHEMATICAL MODELING OF COMBUSTIBILITY INDICATORS OF EPOXY-AMINE COMPOSITES

Introduction. The most common and effective method of reducing the combustibility of polymeric materials is the use of flame retardants. Today, chemically active flame retardants are particularly popular, while the use of inert flame retardants is gradually decreasing. Reactive flame retardants contain functional groups, so they can interact with monomers during polymer synthesis or with macromolecules of already formed polymers. Consequently, they find application not only as monomers in the synthesis of polymers but also as modifiers or crosslinking agents. The development of novel flame retardants and the creation of new formulations of polymeric materials with reduced combustibility are typically conducted empirically, based solely on the dependence of material properties on its composite. The specific characteristics of the flame retardant's influence on the structure of the resulting materials are seldom considered.

Purpose. To carry out thermochemical modeling of the combustibility of epoxy-amine composites based on their structure and to verify the adequacy of the proposed model by means of experimental studies.

Methods. The copper(II)-amine complex and epoxy-amine composites were obtained by direct interaction of the corresponding components. The mathematical modeling of the flame retardant effect of the copper(II)-amine complex on the combustibility of the modified epoxy-amine composite was performed on the basis of the energy values of chemical bonds that occur in the complex. The combustibility of the compositions was evaluated by the heat of combustion (Q_{comb} , kJ/kg), which was calculated according to Hess's law. The combustibility of the epoxy-amine composites was determined experimentally according to DSTU 8829:2019 (Section 7.3).

Results. In this study, cluster fragments of an unmodified epoxy-amine composite (ED/*pepa*) and a composite containing the proposed flame retardant (ED/{[Cu(*deta*)H₂O]SO₄]₂) were generated. This allowed for the modeling of the thermochemical behavior of the composites during combustion. The thermochemical calculations of the combustion reaction of epoxy-amine composites were carried out. The enthalpy of formation of the modified epoxy-amine composite was found to be significantly lower than that of the unmodified one. This regularity can be explained by the processes of complexation between copper(II) salt and *pepa* in the process of structuring the modified epoxy amine composite. The appearance of additional Cu(II)—N coordination bonds results in the release of energy. This phenomenon is evident in the combustibility of epoxy-amine composites, as substantiated by the calculation of their heat of combustion and subsequent experimental validation of their combustibility.

Conclusions. A mathematical model was developed to predict the indicators combustibility of epoxy-amine composites. The model, which was based on the structure of the epoxy-amine composites, revealed the mechanism by which the copper(II)-amine complex enhances flame retardancy. Specifically, the model indicated that the formation of additional Cu—N chemical bonds is responsible for the reduction in combustibility of the modified epoxy-amine composites. The developed mathematical model was found to be in agreement with the results of experimental studies. Specifically, the incorporation of a copper(II)-amine complex into the epoxy-amine composition has been demonstrated to enhance all the parameters that are typically utilized to assess combustibility.

Key words: mathematical modeling, chemical bonds energy, epoxy-amine composites, copper(II)-amine complexes, flame retardants, combustibility.

Постановка проблеми. Горючість полімерних матеріалів є однією з основних кваліфікаційних характеристик, за якою оцінюють їх пожежовибухонебезпечність. Це не випадково, адже горючість вказує на схильність полімерів до займання, підтримання та поширення горіння. Як правило, горіння полімерних матеріалів виникає внаслідок займання легких продуктів термічної деструкції. Проте якщо кількість виділених газоподібних продуктів менша за нижню концентраційну межу поширення полум'я, то горіння може розпочатися внаслідок гетерогенної реакції на поверхні розділу фаз.

На схильність до займання та горіння полімерів впливає низка факторів, найважливішими з яких є їхній склад та будова макромолекул. Так, полімери аліфатичної будови, полімери з ароматичними замісниками є легкозаймистими матеріалами, тоді як полімерні матеріали, які містять у своїй структурі атоми галогенів, навпаки, є важкозаймистими. Полімери з ароматичними групами в основному ланцюзі є менш горючими, ніж полімери з ароматичними групами в бічних ланцюгах [1]. Горючість полімерів залежить також від інтенсивності теплового потоку, який діє на

поверхні полімерного матеріалу, швидкості дифузії кисню в зону горіння, тиску, рівня вологості та хімічного складу середовища.

Знизити горючість полімерних матеріалів здебільшого можна завдяки керованому впливу на процеси тепло- і масообміну, які протікають у конденсованій і газовій фазах [2]. Зокрема, внаслідок ендотермічного розкладання полімеру чи виділення летких продуктів розкладання відбувається охолодження полімерного матеріалу, що призводить до зменшення інтенсивності його деструкції. Виділення негорючих газів внаслідок цих перетворень призводить до охолодження полум'я та до зменшення концентрації кисню в зоні горіння. За зниження інтенсивності теплового потоку від полум'я до поверхні полімерного матеріалу завдяки створенню захисних шарів зменшується швидкість газифікації полімеру, змінюється співвідношення горючих і негорючих продуктів розкладання матеріалу на користь останніх.

Отже, під час розроблення полімерних матеріалів зі зниженою горючістю можна виділити такі основні підходи: керований синтез важкогорючих полімерів, хімічна модифікація, нанесення вогнезахисних покриттів, додавання наповнювачів і використання антипіренів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із найефективніших і перспективних методів зниження горючості полімерних матеріалів є синтез важкогорючих полімерів з мінімальним вмістом органічної складової частини, яка слугує джерелом горючих газів. Важкогорючі епоксиполімери можна отримати шляхом синтезу високомолекулярних сполук з ароматичною та гетероциклічною структурою, розкладання яких супроводжується утворенням значної кількості карбонізованого залишку. Іншим напрямом є створення полімерів, які повністю розкладаються з виділенням лише негорючих газів. Однак такі матеріали мають значно вищу вартість порівняно з традиційними, що стримує їх широке виробництво [3].

Модифікація полімерів для зниження їхньої горючості передбачає контрольовану зміну структури макромолекул під дією хімічних або фізичних агентів. Вона може здійснюватися як на етапі синтезу та переробки полімеру у виробі, так і після отримання готового матеріалу. Для ефективного зменшення горючості епоксиполімерів модифікація має призводити до зміцнення міжатомних зв'язків, зокрема завдяки утворенню ароматичних фрагментів зі спряженими подвійними чи потрійними зв'язками або різних гетероциклів [4].

Горючість полімерних матеріалів можна знизити також завдяки використанню вогнезахисних

покриттів. Відомо про застосування покриттів, горючість яких є значно нижчою за горючість матеріалу, на який наноситься покриття, а також з тепловідбиваючими та теплоізолюючими властивостями. Проте найефективнішими є інтумесцентні вогнезахисні покриття, які під час нагрівання утворюють карбонізований піноподібний шар, що забезпечує захист полімерного матеріалу від теплового впливу [5].

Під час застосування наповнювачів для зниження горючості полімерів кількість і склад продуктів деструкції в газовій фазі та вихід карбонізованого залишку в умовах горіння практично не змінюються [6]. Введення наповнювачів в полімер призводить до зниження вмісту горючої складової частини, що позначається на зміні його теплофізичних характеристик та умов тепло- і масообміну під час горіння. Такий спосіб зниження горючості полімерів є економічно вигідним, адже наповнювачі покращують ще й фізико-механічні властивості полімерних матеріалів, знижують витрату цінної, а іноді й дефіцитної сировини.

Найпоширенішим і найефективнішим методом зниження горючості полімерних матеріалів є використання антипіренів [7]. Вони можуть діяти у газовій фазі, інгібуючи екзотермічну реакцію окиснення шляхом дезактивації вільних радикалів, що зменшує зворотний потік енергії на поверхню полімеру. Крім того, антипірени сприяють утворенню теплового бар'єру на поверхні конденсованої фази, що запобігає виділенню горючих газоподібних продуктів. Їх застосування також підвищує вихід карбонізованого залишку, що зменшує утворення горючих газів.

Сьогодні особливо популярними є хімічно активні антипірени, тоді як застосування інертних антипіренів поступово скорочується. Це зумовлено низкою недоліків, характерних для антипіренів адитивного типу. Вони лише механічно змішуються з полімером, що погіршує його фізико-механічні та фізико-хімічні властивості, мають схильність до міграції на поверхню матеріалу та можуть вимиватися водою, мийними засобами чи жирами. На відміну від них, реакційноздатні антипірени містять функціональні групи, тому можуть взаємодіяти з мономерами під час синтезу полімерів або з макромолекулами вже сформованих полімерів. Завдяки цьому їх можна використовувати не лише як мономери під час створення полімерів, але й як модифікатори або зшиваючі агенти.

Проте варто зауважити, що пошук нових антипіренів і розроблення нових рецептур полімерних матеріалів зі зниженою горючістю зазвичай здійснюються емпірично, базуючись лише

на залежності властивостей матеріалу від його складу. А особливості впливу антипірену на будову отриманих матеріалів майже не враховуються.

Мета роботи – термохімічне моделювання горючості епоксіамінних композицій на підставі їх будови та перевірка адекватності запропонованої моделі шляхом експериментальних досліджень.

Експериментальна частина. Досліджували епоксіамінну композицію, яка містила як антипірен-затвердник хелатний купрум(II)-амінний комплекс – аква-(діетилентриаміну)-купрум(II) сульфат $[\text{Cu}(\text{deta})\text{H}_2\text{O}]\text{SO}_4$. Методика отримання епоксіамінної композиції детально описана в роботах [8; 9]. Задля виявлення перспективності застосування запропонованого антипірена-затвердника для зниження горючості епоксиполімерів досліджували також немодифіковану епоксіамінну композицію, яку отримували на основі епоксидіанового олігомера ЕД-20 та амінного затвердника поліетилентріаміну (*пера*) [10].

Математичне моделювання електронної структури молекулярних, кристалічних та нанокластерних систем проводили за допомогою квантово-хімічних обчислень [11]. Спочатку будували структурні кластери [12] та переводили їх у зручний для використання в програмі “HyperChem” формат. Для побудованих кластерів здійснювали квантово-хімічні обчислення енергетичних, геометричних і електронних параметрів. Електронну структуру кластерних фрагментів обчислювали напівемпіричними методами розв’язку хвильового рівняння Шредінгера:

$$\left(-\frac{\hbar^2}{8\pi^2 m_e} \sum_{i=1}^m \nabla_i^2 + U \right) \psi_i = \epsilon_i \psi_i, \quad (1)$$

де $\hbar$ – стала Планка; m_e – маса електрона; ∇_i^2 – оператор Лапласа, який дорівнює $\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$; E – повна енергія системи; ψ_i – хвильова функція i -го електрона; e – елементарний електричний заряд (заряд електрона), який дорівнює $1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл; U – потенційна енергія системи, до складу якої входить n -на кількість атомних остовів (A_{ij}) і m -на кількість валентних електронів (e_{ij}), що перебувають один від одного на певній відстані r :

$$U = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{e^2}{r_{A_i A_j}} + \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m \frac{e^2}{r_{e_i e_j}} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{e^2}{r_{A_i e_j}}. \quad (2)$$

Для розв’язку рівняння (1) застосовували напівемпіричний метод ZINDO/1, який дає змогу з високим ступенем вірогідності розв’язувати хвильове рівняння для багатоатомних систем,

якими є кластери з розташованими певним чином атомами. Напівемпіричний метод ZINDO/1 дав змогу обчислити низку енергетичних параметрів (розподіл за енергіями молекулярних орбіталей та енергію хімічних зв’язків) у досліджуваних нанокластерах, які в подальшому були використані під час виконання термохімічних обчислень.

Стандартну ентальпію утворення речовини обчислювали виходячи зі значень енергій хімічних зв’язків, отриманих квантово-хімічно:

$$\Delta H_{\text{утв.}}^0 = \sum_{i=1}^{i_0} v_i E_{A_i} - \sum_{j=1}^{j_0} v'_j E_{A'_j}, \quad (3)$$

де E_{A_i} , $E_{A'_j}$ – енергії хімічних зв’язків в молекулах i -ї вихідної речовини та j -го продукту реакції.

Математичне моделювання антипіренового впливу хелатного купрум(II)-амінного комплексу на горючість модифікованої епоксіамінної композиції проводили на основі значень енергій хімічних зв’язків, які виникають у комплексі. Горючість композицій оцінювали за теплою згоряння ($Q_{\text{зг}}$, кДж/кг), яку обчислювали за законом Гесса, на підставі визначених квантово-хімічно значень енергій хімічних зв’язків.

Для підтвердження чи спростування запропонованої моделі експериментально визначали горючість епоксіамінних композицій за максимальним приростом температури (Δt_{max}), часом досягнення максимальної температури газоподібних продуктів горіння (τ) та втратою маси зразка внаслідок горіння (Δm) згідно з ДСТУ 8829:2019 (п. 7.3).

Виклад основного матеріалу. На першому етапі роботи було згенеровано кластерні фрагменти немодифікованої епоксіамінної композиції (ЕД/*пера*) та композиції з вмістом запропонованого антипірена-затвердника (ЕД/ $\{[\text{Cu}(\text{deta})\text{H}_2\text{O}]\text{SO}_4\}_2$), що дало змогу змоделювати термохімічну поведінку композицій під час горіння. Отже, на рис. 1 та 2 наведено хімічний склад та графічні формули отриманих кластерних фрагментів епоксіамінних композицій.

Аналіз графічної формули кластера $\text{C}_{39}\text{O}_7\text{H}_{44}/(\text{C}_4\text{N}_3\text{H}_{13})(\text{C}_2\text{N}_2\text{H}_8)$ (рис. 1) свідчить про те, що в немодифікованій епоксіамінній композиції ЕД/*пера* відсутні додаткові хімічні зв’язки, які могли б виникнути внаслідок взаємодії антипірену із затвердником епоксидних смол. Тому під час оцінювання енергетичного впливу антипірену на горючість модифікованої епоксіамінної композиції було враховано значення сумарної енергії всіх хімічних зв’язків в немодифікованій епоксіамінній композиції.

Епоксіамінна композиція, отримана з використанням антипірена-затвердника, окрім двох зв’язків $\text{Cu}(\text{II})\text{—O}$, містить шість координаційних

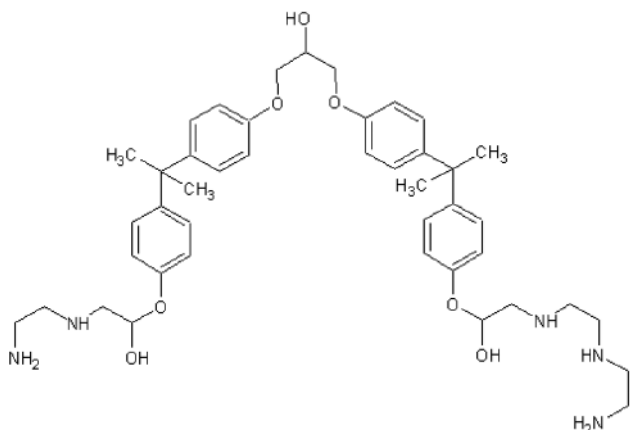


Рис. 1. Графічна формула кластера $C_{39}O_7H_{44}/(C_4N_3H_{13})(C_2N_2H_8)$

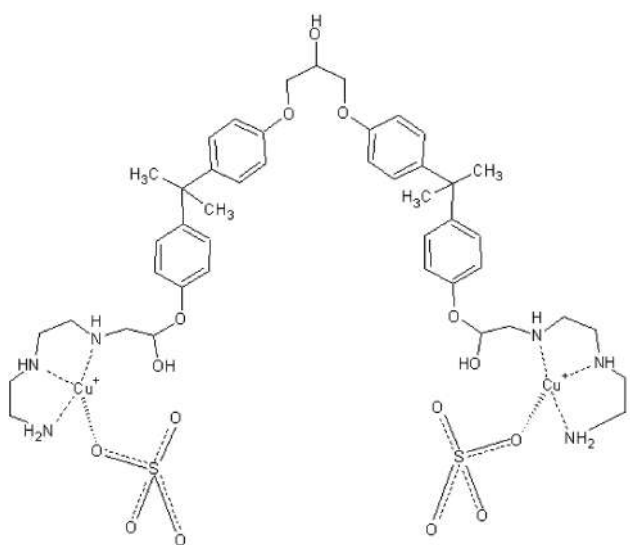
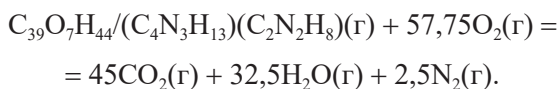


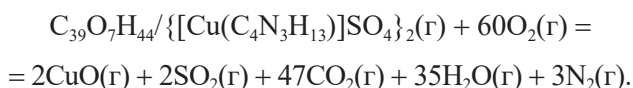
Рис. 2. Графічна формула кластера $C_{39}O_7H_{44}/\{[Cu(C_4N_3H_{13})]SO_4\}_2$

зв'язків Cu(II)–N. Поява додаткових хімічних зв'язків однозначно буде впливати на горючість модифікованої епоксіамінної композиції.

Реакція горіння немодифікованої епоксіамінної композиції ЕД/*пера*, вочевидь, протікає за таким рівнянням реакції:



Перебіг реакції горіння модифікованої епоксіамінної композиції ЕД/{[Cu(*deta*)H₂O]SO₄]₂ найвірогідніше, описується рівнянням реакції:



Важливим є те, що внаслідок згоряння модифікованої епоксіамінної композиції, на відміну від немодифікованої, окрім вуглекислого газу, водяної пари та азоту, виділяються додаткові продукти згоряння, а саме газоподібний сульфур(IV) оксид, флегматизатор горіння та порошкоподібний купрум(II) оксид, який проявляє інгібувальну дію на полум'я.

В табл. 1 зведені обчислені значення енергій хімічних зв'язків кластерних фрагментів досліджуваних композицій.

Таблиця 1

Обчислені значення енергій хімічних зв'язків кластерних фрагментів досліджуваних епоксіамінних композицій

Структурний фрагмент композиції	$\sum E_{\text{зв}},$ кДж/моль
$C_{39}O_7H_{44}/(C_4N_3H_{13})(C_2N_2H_8)(г)$	50 407
$C_{39}O_7H_{44}/\{[Cu(C_4N_3H_{13})]SO_4\}_2(г)$	56 612

В табл. 2 представлені результати термохімічних обчислень реакції горіння епоксіамінних композицій. Внаслідок проведеного квантово-хімічного моделювання процесів горіння епоксіамінних композицій виявлено низку особливостей їх термохімічної поведінки. Зокрема, значення ентальпії утворення модифікованої епоксіамінної композиції порівняно з немодифікованою суттєво нижче. Таку закономірність можна пояснити протіканням процесів комплексоутворення між сіллю купруму(II) та *пера* в процесі структурування модифікованої епоксіамінної композиції. Завдяки появі додаткових координаційних зв'язків Cu(II)–N виділяється енергія. Безперечно, це позначатиметься на горючості епоксіамінних композицій.

Обчислене значення теплоти згоряння немодифікованої епоксіамінної композиції значно перевищує 2 100 кДж/кг, що дає підстави віднести її до горючих матеріалів. Значення теплоти згоряння модифікованої епоксіамінної композиції порівняно з немодифікованою суттєво нижчі. Це свідчить про високу ефективність антипіренової дії хелатного купрум(II)–амінного комплексу на зниження горючості епоксіамінних композицій.

Запропонована квантово-хімічна модель, у якій враховано вплив процесів комплексоутворення між аміним затвердником епоксидних

Таблиця 2

Результати термохімічних обчислень горіння епоксіамінних композицій

Епоксіамінна композиція	$H_{\text{утв}}^{\circ}$, кДж/моль	$H_{\text{зг}}^{\circ}$, кДж/моль	$Q_{\text{зг}}^{\circ}$, кДж/кг
ЕД/ <i>пера</i> (г)	–10,8	–25 441	32 327
ЕД/{[Cu(<i>deta</i>)H ₂ O]SO ₄] ₂ (г)	–134	–26 761	23 270

Результати визначення горючості епоксіамінних композицій

Показник властивостей композицій	Композиція	
	ЕД/репа	ЕД/[Cu(deta)H ₂ O]SO ₄] ₂
Початкова температура випробування, t_o , °C	200	200
Максимальна температура продуктів горіння, t_{max} , °C	867	638
Максимальний приріст температури, Δt_{max} , °C	667	438
Час досягнення максимальної температури, τ , с	150	215
Втрата маси, Δm , %	89,0	78,0

смола і антипіреном під час формування епоксіамінних композицій на зниження їх горючості, корелює з результатами проведених експериментальних досліджень. Як свідчать результати експериментального визначення показників групи горючості епоксіамінних композицій, наведені в табл. 3, для зразків немодифікованої композиції максимальний приріст температури перевищує 60 °C, а втрата маси внаслідок горіння становить понад 60 %. Час досягнення максимальної температури продуктів горіння зразків цієї композиції лежить у межах від 30 с до 240 с. Тому, відповідно до ДСТУ 8829:2019, немодифікована епоксіамінна композиція є горючим матеріалом середньої займистості.

Введення в композицію хелатного купрум(II)-амінного комплексу супроводжується покращенням усіх показників, за якими оцінюють горючість. Так, максимальний приріст температури та втрата маси під час горіння модифікованої епоксіамінної композиції порівняно з немодифікованою знижується на 229 °C та 11,0 % відповідно, а час досягнення максимальної температури газоподібних продуктів горіння, навпаки, збільшується на 65 с.

Окрім того, візуальні спостереження засвідчили різний характер поведінки епоксіамінних композицій під час займання та горіння. Немодифікована композиція під дією полум'я газового пальника легко займалася та продовжувала інтенсивно горіти після припинення дії джерела запалювання. Процес горіння супроводжувався надзвичайно інтенсивним виділенням диму та сажі і важко піддавався гасінню. Зразок композиції з антипіреном-затвердником виявився більш стійким до займання, а під час його горіння кількість диму, що виділялася, була помітно нижчою, ніж під час горіння немодифікованої композиції. Все це, безумовно, впливає на зниження горючості епоксіамінних композицій під час введення антипірена-затвердника у вигляді хелатного купрум(II)-амінного комплексу. Причиною цього є збільшення витрат теплової енергії на розрив координаційних зв'язків, що, зрештою, приводить до зниження інтенсивності газифікації полімеру

та збільшення виходу карбонізованого залишку внаслідок термоокисної деструкції полімеру.

Висновки. На підставі будови епоксіамінних композицій проведено квантово-хімічне моделювання їх горючості. Завдяки здійсненим обчисленням було встановлено причину антипіренової дії купрум(II)-амінного комплексу, сутність якої полягає в утворенні додаткових хімічних зв'язків Cu–N, відповідальних за зниження горючості модифікованих епоксіамінних композицій. Результати математичного моделювання корелюють з результатами проведених експериментальних досліджень. Так, обчислене значення теплоти згоряння композиції, модифікованої купрум(II)-амінним комплексом порівняно з немодифікованою композицією зменшується в 1,39 разів. Експериментально визначена максимальна температура газоподібних продуктів горіння композиції під час введення комплексу знижується в 1,36 разів, втрата маси зменшується в 1,14 разів, а час досягнення максимальної температури збільшується в 1,43 разів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Dasari A., Yu Zh.-Zh., Cai G.-P., Mai Y.-W. Recent developments in the fire retardancy of polymeric materials. *Progress in Polymer Science*. 2013. Vol. 38(9). P. 1357–1387.
2. Levchik S., Weil E. Thermal decomposition, combustion and flame-retardancy of epoxy resins – a review of the recent literature. *Polymer International*. 2004. Vol. 53. P. 1901–1929.
3. Liu Q., Wang D., Li Z., Li Z., Peng X., Liu C., Zheng P. Recent Developments in the Flame-Retardant System of Epoxy Resin. *Materials*. 2020. Vol. 13(9). P. 2145.
4. Iji M., Kiuchi Y. Self-extinguishing epoxy molding compound with no flame-retarding additives for electronic components. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2001. Vol. 12(12). P. 715–723.
5. Кіреєв О.О. Вогнезахисті властивості силікатних гелеутворюючих систем. *Науковий вісник будівництва*. 2006. Вип. 37. С. 188–192.
6. Лавренюк О.І. Застосування мінеральних наповнювачів для зниження горючості епоксиполімерів. *Пожежна безпека*. 2013. № 22. С. 163–166.

7. Rakotomalala M., Wagner S., Doring M. Recent Developments in Halogen Free Flame Retardants for Epoxy Resins for Electrical and Electronic Applications. *Materials*. 2010. Vol. 3(8). P. 4300–4327.

8. Лавренюк О.І., Михалічко Б.М. Рентгенофазовий та ІЧ-спекроскопічний аналіз процесу структурування модифікованих епоксидних композицій за участю антипірену [Cu(діетиленetriамін)H₂O]SO₄ · H₂O. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2016. Vol. 5–6(109). С. 73–77.

9. Лавренюк О.І., Михалічко Б.М. Епоксидна композиція зі зниженою горючістю. Патент на винахід № 109187 Україна: МПК C08L63/00. № а201311816; заявл. 07.10.2013; опубл. 27.07.2015, Бюл. № 14. 2 с.

10. Лавренюк О.І., Михалічко Б.М., Пастухов П.В., Петровський В.Л. Модифіковані купрум(II) сульфатом самозгасаючі епоксидні композиції: технологія отримання та горючі властивості. *Пожежна безпека*. 2014. № 25. С. 69–73.

11. HyperChem: Molecular modeling system. Hypercube, Inc., Release 8.0.6, Florida. USA. 1995–2009.

12. Diamond-Crystal and Molecular Structure Visualization Crystal Impact. Dr. H. Putz & Dr. K. Brandenburg GbR, Kreuzherrenstr. 102, 53227 Bonn, Germany.

REFERENCES

1. Dasari A., Yu Zh.-Zh., Cai G.-P., Mai Y.-W. (2013) Recent developments in the fire retardancy of polymeric materials. *Progress in Polymer Science*. Vol. 38(9). P. 1357–1387.

2. Levchik S., Weil E. (2004) Thermal decomposition, combustion and flame-retardancy of epoxy resins – a review of the recent literature. *Polymer International*. Vol. 53. P. 1901–1929.

3. Liu Q., Wang D., Li Z., Li Z., Peng X., Liu C., Zheng P. (2020) Recent Developments in the Flame-Retardant System of Epoxy Resin. *Materials*. Vol. 13(9). P. 2145.

4. Iji M., Kiuchi Y. (2001) Self-extinguishing epoxy molding compound with no flame-retarding

additives for electronic components. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. Vol. 12(12). P. 715–723.

5. Kireev O.O. (2006) Vohnezakhysti vlastyvoli sylikatnykh helevtoriuvnykh system. [Fire-retardant properties of silicate gel-forming systems]. *Scientific Bulletin of Construction*. Issue 37. P. 188–192.

6. Lavrenyuk O.I. (2013) [Application of mineral fillers to reduce the flammability of epoxy polymers]. *Fire Safety*. Vol. 22. P. 163–166.

7. Rakotomalala M., Wagner S., Doring M. (2010) Recent Developments in Halogen Free Flame Retardants for Epoxy Resins for Electrical and Electronic Applications. *Materials*. Vol. 3(8). P. 4300–4327.

8. Lavrenyuk O.I., Mykhalichko B.M. (2016) Renthenofazovyi ta ICh-spekroskopichnyi analiz protsesu strukturuвання modyfikovanykh epoksyaminnykh kompozitsii za uchastiu antypirenu [X-ray phase and IR spectroscopic analysis of the process of structuring modified epoxyamine compositions with the participation of the flame retardant] [Cu(diethylenetriamine)H₂O]SO₄ · H₂O. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. Vol. 5–6(109). P. 73–77.

9. Lavrenyuk H., Mykhalichko B. (2015) Epoksydna kompozitsiia zi znyzhenoiu horiuchistiu. [Epoxy composite with lowered combustibility]. Patent No. 109187 UA.

10. Lavrenyuk O.I., Mykhalichko B.M., Pastukhov P.V., Petrovsky V.L. (2014). Petrovskyi V.L. Modyfikovani kuprum(II) sulfatom samozghasaiuchi epoksyaminni kompozitsii: tekhnolohiia otrymannia ta horiuchi vlastyvoli [Copper(II) sulfate-modified self-extinguishing epoxyamine compositions: production technology and combustible properties]. *Fire Safety*. Vol. 25. P. 69–73.

11. HyperChem: Molecular modeling system. Hypercube, Inc., Release 8.0.6, Florida. USA. 1995–2009.

12. Diamond-Crystal and Molecular Structure Visualization Crystal Impact. Dr. H. Putz & Dr. K. Brandenburg GbR, Kreuzherrenstr. 102, 53227 Bonn, Germany.

© О. І. Лавренюк, Б. М. Михалічко

Науково-методична стаття

Надійшла до редакції 06.03.2025

Прийнято до публікації 04.06.2025



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.46.2025.07>

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

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

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

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

<https://orcid.org/0000-0003-4343-8822> – Б. Я. Бойчук

✉ o.lazarenko@ldubgd.edu.ua

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ДРІБНОРОЗПИЛЕНИХ СТРУМЕНІВ ВОДИ ПІД ЧАС ГАСІННЯ ПОЖЕЖ У ПІДВАЛЬНИХ ПРИМІЩЕННЯХ

Вступ. Типові проекти житлових будинків передбачають розміщення у підвалах підсобних приміщень, які можуть бути захащені самими мешканцями, утворюючи велике пожежне навантаження, що здатне викликати пожежу за необережного поводження з вогнем сторонніх осіб. Гасіння пожеж у підвальних приміщеннях завжди пов'язане з низкою складнощів. Завжди є ризик вибуху через прокладені там різноманітні магістральні мережі. Складність гасіння полягає також у невеликій площі приміщення та його місцезнаходженні. Слід враховувати вузькі проходи та низькі стелі, що може ускладнювати прохідність та евакуацію.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є оцінка ефективності використання дрібно розпиленого струменя води, генерованого системою високого тиску, на температурні показники в приміщенні під час пожежі.

Для досягнення поставленої мети в роботі проведено аналіз ефективності використання дрібно-розпиленних струменів води для осадження продуктів горіння та безпосереднього гасіння пожежі в огороженні; підготовлено матеріальну базу, підвальне приміщення та технічні засоби для проведення експериментального дослідження; здійснено безпосереднє експериментальне дослідження з реальним задимленням та температурними показниками, близькими до реальних умов розвитку пожежі в огороженні.

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

Результати. Експериментальні дослідження довели ефективність використання ствола-пробійника для зниження температури в приміщенні, зокрема в підвальних та напівпідвальних приміщеннях, що не вимагає залучення особового складу в зоні дії високих температур.

Висновки. Використання ствола-пробійника під високим тиском дає змогу знизити середню температуру в приміщенні об'ємом 12 м³ на 300–350 °С впродовж 2–3 хвилин. Тактика використання ствола-пробійника як основного технічного засобу для гасіння пожеж в огороженні за умови високих температур, складного планування та обмеженого простору повинна стати основоположною і в подальшому замінити застарілі методи гасіння подібних пожеж.

Ключові слова: розпилена вода, гідравлічний струмінь, зниження температури, тактика гасіння, ствол-пробійник, дрібнодисперсні струмені, підвальне приміщення.

QUALITATIVE ASSESSMENT OF WATER MIST JETS APPLIED DURING EXTINGUISHING FIRES IN BASEMENT

Introduction. Typical designs of residential buildings provide for the placement of utility rooms in basements, which can be cluttered by the residents themselves, creating a large fire load, all of which can cause a fire if unauthorized persons handle the fire carelessly. Extinguishing fires in basements is always associated with several difficulties. There is always a risk of explosion due to the various main networks. The difficulty of extinguishing also lies in the small area of the room and its location. Narrow passages and low ceilings should be considered, which can complicate passage and evacuation.

The purpose and objectives of the study. The work aims to assess the effectiveness of using a finely atomized water jet generated by a high-pressure system on temperature indicators in a room during a fire. To achieve the goal, the work analyzed the effectiveness of using finely atomized water jets to deposit combustion products and directly extinguish a fire in an enclosure; prepared the material base, basement and technical means for conducting an experimental study; carried out a direct experimental study with real smoke and temperature indicators close to the real conditions of fire development in an enclosure.

Methods. To achieve the goal of the work, experimental studies were conducted with conditions as close as possible to real ones (temperature, flame, smoke). The obtained results of the experimental studies were recorded using certified equipment and subsequently summarized using appropriate software (Microsoft Excel).

Results. Experimental studies have proven the effectiveness of using a fognail to reduce the temperature in a room, in particular in basements and semi-basement rooms, without requiring the involvement of personnel in the area of high temperatures.

Conclusions. The use of a high-pressure fognail allows you to reduce the average temperature in a room with a volume of 12 m³ by 300-350 °C within 2-3 minutes. The tactic of using a fognail as the main technical means for extinguishing fires in enclosures under conditions of high temperatures, complex planning and limited space should become fundamental and, in the future, replace outdated methods of extinguishing such fires.

Key words: water mist, hydraulic jet, temperature reduction, extinguishing tactics, fine jets, basement.

Вступ. За статистикою, більше 90 % пожеж трапляються в житловому секторі [1]. Переважними місцями виникнення пожеж у житловому секторі є житлові кімнати або місця зберігання побутових речей власників, зокрема підвальні приміщення. В холодну пору ймовірність виникнення пожеж у підвальних приміщеннях підвищується у зв'язку з перебуванням там безхатків та можливості розведення неконтрольованих осередків горіння. Водночас підвальні приміщення – це найбільш поширена локація для розміщення там цільових побутових приміщень, таких як лазні, сушильні камери, що значно підвищує пожежну небезпеку таких приміщень та збільшує в декілька разів пожежне навантаження на приміщення.

Постановка проблеми. Питання гасіння пожеж у підвальних приміщеннях є одним з найскладніших з точки зору пожежогасіння [2]. З огляду на складну конфігурацію підвальних приміщень, обмежену вентиляцію та невеликий об'єм самих приміщень вільний розвиток горіння в підвальних приміщеннях буде насамперед характеризуватися стрімким зростанням температури. Доволі часто температура в підвальному приміщенні може досягати більше +1000 °C

з одночасним сильним задимленням всієї площі. Відповідні небезпечні фактори пожежі унеможливають виконання стандартних процедур оперативно-рятувальними підрозділами.

З огляду на складну тактичну обстановку під час пожежі необхідно вживати додаткових заходів щодо зниження температури в підвальному приміщенні та видалення продуктів горіння, зокрема необхідно проводити тактичну вентиляцію [3; 4] з використанням повітряних нагнітачів (ПН), повітряно-механічної піни (ПМП) високої кратності або залученням спеціального аварійно-рятувального обладнання. Використання ПН або ПМП за умови дії високої температури може бути мало-ефективним, оскільки встановлення ПН вимагає наявності ланки газодимозахисної служби в безпосередній близькості до приміщень з високою температурою. Водночас дія високої температури буде руйнувати ПМП і не давати бажаного ефекту. Відповідно, зазначені тактичні рішення будуть ефективними за умови безпосереднього зниження температури продуктів згорання до межі 100–200 °C.

З огляду на особливості та унікальні теплофізичні параметри води єдиними засобами,

здатними ефективно знизити температуру середовища, залишаються вода та водні розчини. Ефективність використання води як основного охолоджуючого та вогнегасного засобу підтверджена значною кількістю практичних та теоретичних досліджень [5–9].

Так, зокрема, в роботі [5] наведено результати комп'ютерного моделювання (FDS/PyroSim) щодо ефективності використання дрібнорозпиленої води під час гасіння умовної пожежі в промислових будівлях. Встановлено, що загальний час гасіння умовної пожежі зменшується за умови величини водяної краплі 30 мкм та витрати води до 40 л/хв.

У дослідженнях [6; 7] наведені результати ефективності пароутворюючої здатності залежно від величини водяної краплі. Зокрема, розглядаються краплі від 100 до 1000 мкм. Відповідно, у джерелі [7] встановлено, що оптимальний розмір краплі повинен становити ≤ 200 мкм. Водночас робота [6] дає чітке розуміння, що загальний процес ефективності пароутворення безпосередньо залежатиме від потужності джерела теплового випромінювання та загальної температури в приміщенні.

Щодо використання ручних пожежних стволів як основного технічного засобу генерування дрібно розпиленого струменя води під час гасіння пожеж в огороженні можна виокремити стволи-пробійники різного гатунку, зокрема такі системи, як “Cobra” [9].

Ефективність використання ствола-пробійника, що працював під тиском 0,8 МПа, добре відображена в роботі [10]. Експериментальні

дослідження, які проводилися в приміщенні загальною площею 25 м² з висотою стелі 2,5 м, показали, що застосування відповідного ствола дає змогу знизити загальну температуру приміщення на 250–300 °С (з першопочаткової температури +400–500 °С) впродовж 50–100 секунд.

Отже, основним показником ефективності використання води як охолоджувального засобу є ефективний розмір водяної краплі, а також інтенсивність (продуктивність) подачі води в осередок горіння. Водночас ефективність застосування дрібнорозпиленого струменя залежатиме від геометричних розмірів приміщення та температурних показників середовища.

Постановка мети та завдань дослідження.

Відповідно до аналізу наукових публікацій та останніх наукових досягнень, метою роботи є оцінка ефективності використання дрібно розпиленого струменя води, генерованого системою високого тиску, на температурні показники в приміщенні під час пожежі.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- здійснити аналіз ефективності використання дрібнорозпилистих струменів води для осадження продуктів горіння та безпосереднього гасіння пожежі в огороженні;
- підготувати відповідне підвальне приміщення та технічні засоби для проведення експериментального дослідження;
- здійснити безпосереднє експериментальне дослідження з реальним задимленням та температурними показниками, близькими до реальних умов розвитку пожежі в огороженні.

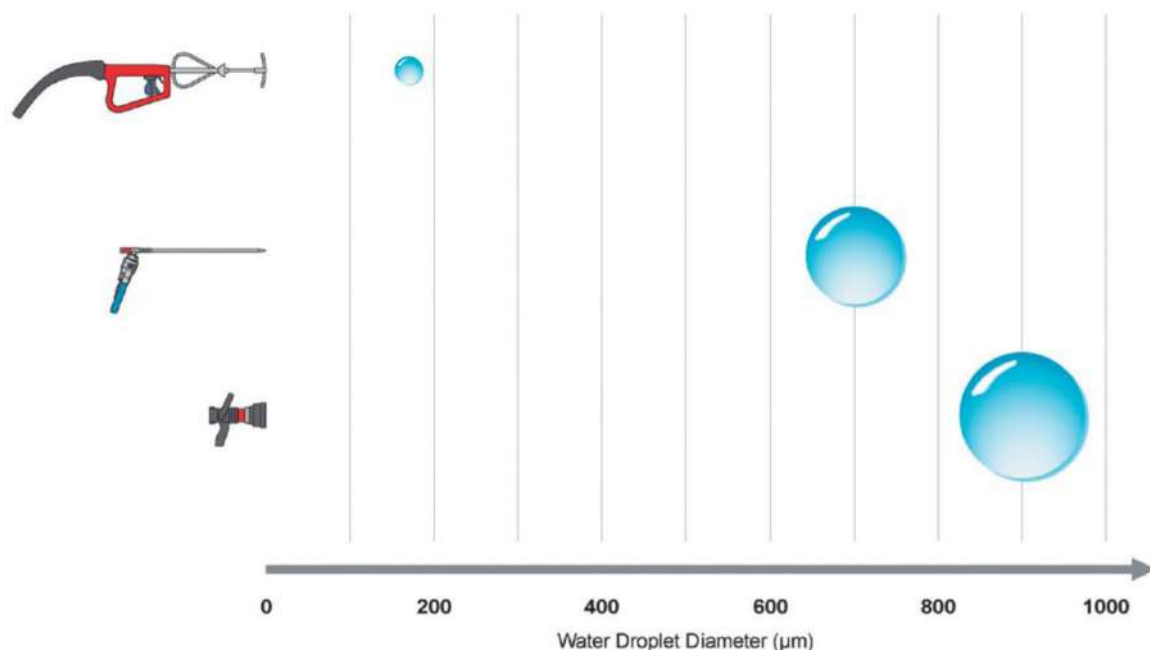


Рис. 1. Мінімальний діаметр крапель залежно від виду пожежного ствола [9], що працюють під тиском більше 2 МПа

Виклад основного матеріалу. Експериментальні дослідження проводилися на базі тренувального полігону м. Тінглев Данського агентства з надзвичайних ситуацій.

Завдяки можливостям полігону для проведення експериментальних досліджень було вибрано напівпідвальне приміщення загальним розміром $2 \times 3 \times 2$ (ширина $\times$ довжина $\times$ висота) в цегляному будинку із залізобетонним перекриттям (рис. 2). Пожежна навантага в приміщенні було сформована відповідно до правил [11] (ОСБ панелі та солома) загальною потужністю теплового випромінювання 2–3 МВт.

Для визначення температурних показників було використано термопари з безпосереднім виводом даних на персональний комп'ютер. Термопари розміщувалися на висоті стелі та на 1,5 метри від підлоги приміщення. Як основний засіб для зниження температури в приміщенні було вибрано ствол-пробійник (рис. 3) з можливістю подачі дрібно-розпиленого струменя води під високим тиском в діапазоні від 1–2 МПа.

Детальні характеристики ствола наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Тактико-технічні характеристики ствола-пробійника високого тиску

Параметр	Величина
Довжина, м	0,52
Діаметр отворів насадка, м	0,019
Вага, кг	1,1
Дальність подачі струменя	до 8 м
Максимальний робочий тиск, МПа	2
Витрата (за тиску 0,6 МПа), л/хв	70

Відповідно до задач дослідження порядок експерименту був таким.

- 1) Перш за все здійснювалося запалювання пожежного навантаження в приміщенні підвалу.
- 2) Спостереження за вільним розвитком (перебігом) горіння та зняття показників температури в приміщенні.



а



б

Рис. 2. Зображення матеріальної бази для проведення експериментальних досліджень:
а) загальний вигляд будинку з підвальним приміщенням; б) мобільна лабораторія для зняття температурних показників



а



б

Рис. 3. Ствол-пробійник високого тиску: а) загальний вигляд ствола; б) насадки ствола

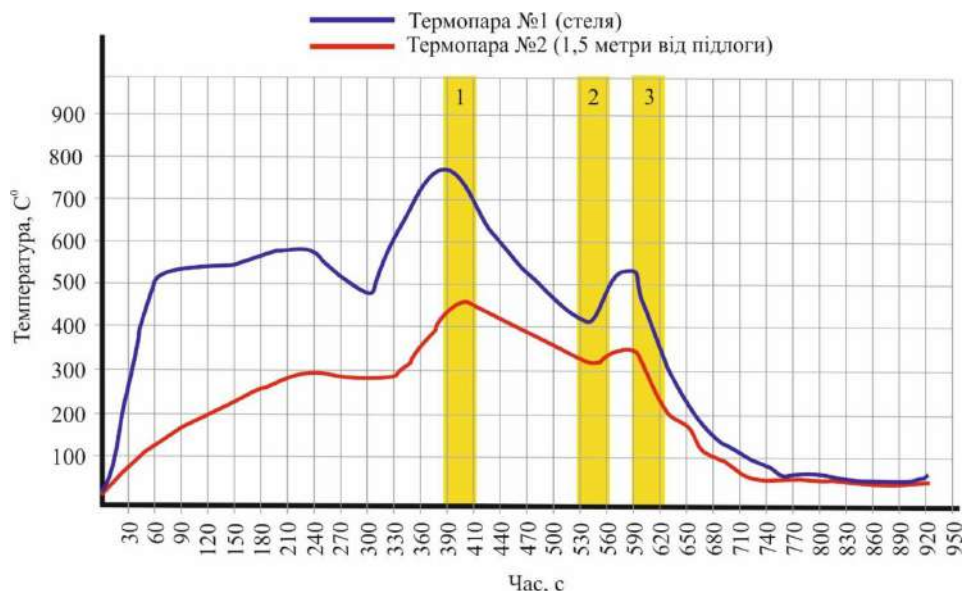


Рис. 4. Графік зміни температурних показників всередині приміщення внаслідок використання ствола-пробійника та подальших дій з гасіння пожежі

3) Після досягнення температурних показників до 600–800 °C здійснюється подача дрібнорозпиленого струменя води під високим тиском (не менше 1 МПа) від ствола-пробійника впродовж 10–20 секунд до моменту пониження середніх температурних показників в приміщенні до межі 150–100 °C.

4) Після пониження загальної температури в приміщенні ланка газодимозахисної служби здійснює безпосереднє гасіння з використанням ручного пожежного ствола.

За результатами експериментальних досліджень було отримано графічну залежність відображення температурних показників всередині напівпідвального приміщення внаслідок застосування ствола-пробійника та дій ланки газодимозахисної служби щодо подальшого гасіння пожежі (рис. 4).

Відповідно до рис. 4 можна стверджувати, що максимальна температура в приміщенні впродовж вільного розвитку горіння (7 хвилин) зросла практично до 800 °C. Такі температурні показники унеможливають роботу ланок газодимозахисної служби та сприяють безпосередньому поширенню горіння на верхні поверхи. Безпосередня подача дрібнорозпиленої води (рис. 4, сектор № 1) під високим тиском (1–1,5 МПа) з використанням ствола-пробійника впродовж 2,6 хвилин (рис. 4, сектор № 2) дала змогу знизити середню температуру в приміщенні на 350 °C. Варто зауважити, що при цьому був відсутній вільний доступ кисню в приміщення.

Повторна подача дрібнорозпиленої води (рис. 4, сектор № 3) впродовж 2 хвилин дала змогу знизити температуру до 100 °C і створила безпечні умови для застосування ланки газодимозахисної служби, яка здійснила остаточне гасіння та повну

ліквідацію горіння.

Загальний час проведення експериментального дослідження від моменту вільного розвитку пожежі до ліквідації горіння склав приблизно 13 хвилин, а безпосередній час реагування з застосуванням стволів та ланки ГДЗС – 5,5 хвилин.

Враховуючи отримані результати експериментальних досліджень, можемо стверджувати, що використання ствола-пробійника є доволі ефективним для зниження температури в приміщенні, зокрема в підвальних та напівпідвальних приміщеннях. Додатково не вимагається залучення особового складу в зоні дії високих температур.

Висновки. Відповідно до мети дослідження можна дійти таких висновків:

- використання ствола-пробійника під високим тиском дає змогу знизити середню температуру в приміщенні об'ємом 12 м³ на 300–350 °C впродовж 2–3 хвилин;
- тактика використання ствола-пробійника як основного технічного засобу для гасіння пожежі в огороженні за умови високих температур, складного планування та обмеженого простору повинна стати основоположною і в подальшому замінити застарілі методи гасіння подібних пожеж.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Аналітична довідка про пожежі та їх наслідки в Україні за 11 місяців 2024 року. URL: <https://dsns.gov.ua/upload/2/2/8/5/6/0/7/analytichna-dovidka-pro-pojeji-112024.pdf>
2. Луц В. І. Полігон для підготовки газодимозахисників до ведення оперативних дій у важких умовах. *Пожежна безпека*. 2013. № 22. С. 177–182.
3. Луц В. І., Лазаренко О. В. Гідравлічна вентиляція та антивентеляція на пожежі. *Надзвичайні*

ситуації: попередження та ліквідація. 2023. Т. 7. № 1. С. 45–55. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2023.7.1.45.55>

4. Лушч В. І., Штангрет Н. О. Експериментальні дослідження впливу видимості на виконання робіт ланкою ГДЗС. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2021. Т. 5. № 2. С. 51–57. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2021.5.2-51-57>

5. M. Samy El Saadany, A. Sharaf Eldin, M. G. Higazy, M. A. El Samanody, M. F. Abd Rabbo. Fire suppression analysis for industrial buildings using water mist. *Engineering research journal*. 2021. Vol. 1. No. 48. P. 46–58. DOI: <https://doi.org/10.21608/erjsh.2021.227962>

6. Shruti Ghanekar, Rajavasanth Rajasegar. In-situ measurement of water-vapor in fire environments using a real-time tunable diode laser-based system. *Fire Safety Journal*. 2021. Vol. 120. 103114. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103114>

7. Mahmud, H. M. I., Thorpe, G., Moinuddin, K. A. M. The behavior of water-mists in hot air induced by a room fire: effect of the initial size of droplets. *Fire*. 2022. № 5. P. 116. DOI: <https://doi.org/10.3390/fire5040116>

8. Zhu, P., Xu, Z., Zhang, J., Shao, Q., Chen, W., Ai, H. Numerical study on fire suppression by water mist in aircraft cargo compartments: effects of spray pattern, droplet size, and nozzle layout. *Fire*. 2024. № 7. P. 481. DOI: <https://doi.org/10.3390/fire7120481>

9. Norbert Tuśnio, Paweł Wolny. New techniques and a new approach to the effective extinguishing of fully developed fires in enclosed spaces. *Internal security*. 2016. Vol. 8, 1. P. 213–224. DOI: <http://dx.doi.org/10.5604/20805268.1231596>

10. Gałaj, J., Wójcik, B. Assessment of the Impact of Extinguishing with a Low-Pressure Fog Lance on a Fire Environment. *Sustainability*. 2022. № 14. P. 6731. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14116731>

11. John W. Regan. Heat Release Rate Characterization of NFPA 1403 Compliant Training Fuels. *Fire Technology*. 2021. Vol. 57. P. 1847–1867. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10694-021-01092-3>

12. Armatec. URL: <https://armatec.pl/produkt/lanca-fognail-atak-obrona>

REFERENCES

1. DSNS Ukrainy. (2024). *Analitichna dovidka pro pozhezhi ta yikh naslidky v Ukraini za 11 misyatsiv 2024 roku* [Analytical report on fires and their consequences in Ukraine for 11 months of 2024]. Retrieved from <https://dsns.gov.ua/upload/2/2/8/5/6/0/7/analitichna-dovidka-pro-pojeji-112024.pdf> [in Ukrainian].

2. Lushch, V. I. (2013). *Polihon dlia pidhotovky hazodymozakhysnykiv do vedennia operatyvnykh dii u vazhkykh umovakh* [Training ground for gas and smoke

protection units for operations in difficult conditions]. *Pozhezhna bezpeka – Fire Safety*, (22), 177–182. [in Ukrainian].

3. Lushch, V. I., & Lazarenko, O. V. (2023). *Hidravlichna ventyliatsiia ta antyventyliatsiia na pozhezhi* [Hydraulic ventilation and anti-ventilation during fire]. *Nadzvychni sytuatsii: poperedzhennia ta likvidatsiia – Emergencies: Prevention and Elimination*, 7 (1), 45–55. <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2023.7.1.45.55> [in Ukrainian].

4. Lushch, V. I., & Shtanhret, N. O. (2021). *Eksperymentalni doslidzhennia vplyvu vydymosti na vykonannia robot lankoiu HDZS* [Experimental research on the impact of visibility on the performance of GDZS unit tasks]. *Nadzvychni sytuatsii: poperedzhennia ta likvidatsiia – Emergencies: Prevention and Elimination*, 5(2), 51–57. <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2021.5.2-51-57> [in Ukrainian].

5. ElSaadany, M. S., SharafEldin, A., Higazy, M. G., El Samanody, M. A., & Abd Rabbo, M. F. (2021). Fire suppression analysis for industrial buildings using water mist. *Engineering Research Journal*, 1(48), 46–58. <https://doi.org/10.21608/erjsh.2021.227962>

6. Ghanekar, S., & Rajasegar, R. (2021). In-situ measurement of water-vapor in fire environments using a real-time tunable diode laser-based system. *Fire Safety Journal*, 120, 103114. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103114>

7. Mahmud, H. M. I., Thorpe, G., & Moinuddin, K. A. M. (2022). The behaviour of water-mists in hot air induced by a room fire: Effect of the initial size of droplets. *Fire*, 5(4), 116. <https://doi.org/10.3390/fire5040116>

8. Zhu, P., Xu, Z., Zhang, J., Shao, Q., Chen, W., & Ai, H. (2024). Numerical study on fire suppression by water mist in aircraft cargo compartments: Effects of spray pattern, droplet size, and nozzle layout. *Fire*, 7(12), 481. <https://doi.org/10.3390/fire7120481>

9. Tuśnio, N., & Wolny, P. (2016). New techniques and a new approach to the effective extinguishing of fully developed fires in enclosed spaces. *Internal Security*, 8(1), 213–224. <http://dx.doi.org/10.5604/20805268.1231596>

10. Gałaj, J., & Wójcik, B. (2022). Assessment of the impact of extinguishing with a low-pressure fog lance on a fire environment. *Sustainability*, 14(11), 6731. <https://doi.org/10.3390/su14116731>

11. Regan, J. W. (2021). Heat release rate characterization of NFPA 1403 compliant training fuels. *Fire Technology*, 57, 1847–1867. <https://doi.org/10.1007/s10694-021-01092-3>

12. Armatec. (n.d.). *Lanca Fognail – Atak / Obrona* [Fognail lance – Attack / Defense]. Retrieved from <https://armatec.pl/produkt/lanca-fognail-atak-obrona>

© О. В. Лазаренко, Р. Ю. Сукач, Я. Б. Великий, Б. Я. Бойчук

Науково-методична стаття

Надійшла до редакції 25.04.2025

Прийнято до публікації 04.06.2025



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.46.2025.08>

В. І. Луц¹, Р. М. Конанець¹, Я. Б. Великий¹, Р. С. Ткаченко², Н. І. Гузар¹,

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

² Вище професійне училище
Львівського державного університету безпеки життєдіяльності,
м. Вінниця, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5931-3181> – В. І. Луц

<https://orcid.org/0000-0003-2360-4002> – Р. М. Конанець

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

<https://orcid.org/0009-0004-5364-814X> – Р. С. Ткаченко

<https://orcid.org/0009-0003-7189-6545> – Н. І. Гузар

✉ yaremavelikiy@gmail.com

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЖИТТЄВИХ ПОКАЗНИКІВ ГАЗОДИМОЗАХИСНИКІВ ПІД ЧАС ІМІТАЦІЇ ВИКОНАННЯ ОПЕРАТИВНИХ ДІЙ НА ПОЖЕЖІ

Гасіння пожеж та ліквідація наслідків надзвичайних ситуацій (далі – НС) в умовах воєнного стану в Україні важко уявити без використання ланок газодимозахисної служби. Для виконання завдань за призначенням пожежні-рятувальники (газодимозахисники) повинні бути у постійній фізичній та психологічній готовності. Це досягається тренуваннями та практичною роботою на пожежах та НС.

Тренування газодимозахисників проводяться в тренувальних комплексах стаціонарного та мобільного типів. Окрім того, за допомогою програмного забезпечення може проводитись тестування газодимозахисника задля визначення його спроможності витримувати навантаження, зумовлені пожежею. Проведений аналіз тестування газодимозахисників у гарнізонах ДСНС України західного та центрального регіонів України показав різні методи та підходи до тренувань: часові показники, умови проведення тренувань тощо.

Мета роботи полягає у проведенні експериментальних досліджень для визначення середнього значення життєвих показників: спалених кілокалорій, частоти серцевих скорочень газодимозахисниками під час виконання оперативних дій, що імітували оперативне розгортання на пожежі.

Для досягнення поставленої мети здійснено аналіз вітчизняних і міжнародних джерел, що визначають порядок підготовки (тестування) газодимозахисників. Для проведення досліджень було вибрано учасників різних медико-вікових груп, визначено вправи для імітації оперативного розгортання на пожежі та необхідне оснащення і обладнання для визначення життєвих показників газодимозахисників, а також витрачений час під час експериментальних досліджень.

На основі проведеного аналізу запропоновано схему періодичності практичної підготовки газодимозахисника.

У статті описано порядок оперативних дій пожежно-рятувального відділення на автоцистерні, що імітують вправи з виконання оперативного розгортання, а саме:

- оперативне розгортання відділення з подачею двох ручних пожежних стволів з прокладанням магістральної лінії на три рукави діаметром 77 мм та двох робочих ліній (по два рукави діаметром 51 мм) зі встановленням автоцистерни на пожежний гідрант;
- зняття, перенесення, встановлення і підйом по висувній триколінній драбині у вікно 3-го поверху навчальної башти;
- підйом та спуск маршевидами сходами 9-поверхової будівлі.

В результаті проведеної роботи встановлено, що середні значення у шести медико-вікових групах були такими: кількість спалених кілокалорій (ккал) – 127; частота серцевих скорочень (уд/хв) – 168; час виконання вправ (с) – 495. Отримані результати буде враховано під час розроблення програмного забезпечення для проведення занять на тренувальних стежках і тренажерах, що дасть змогу тестувати газо-

димозахисників різних медико-вікових груп в умовах, максимально наближених до реальної пожежі (НС), з видачею свідоцтва про тестування, в якому будуть зазначені життєві показники відповідно до роботи в апаратах автономного дихання стисненим повітрям з відкритим контуром.

Ключові слова: тестування газодимозахисника, оперативне розгортання, частота серцевих скорочень, кілокалорії.

V. I. Lushch¹, R. M. Konanets¹, Ya. B. Velykyi¹, R. S. Tkachenko², N. I. Huzar¹

¹Lviv State University of Life Safety,

Lviv, Ukraine,

²Higher Vocational School, Lviv State University of Life Safety,

Vinnitsia, Ukraine

EXPERIMENTAL STUDIES FOR DETERMINING THE VITAL PARAMETERS OF SMOKE DIVERS DURING SIMULATION OF OPERATIONAL ACTIONS AT THE FIRE

Firefighting and emergency response under martial law in Ukraine can hardly be performed without the involvement of smoke divers' units. Firefighters and rescuers (smoke divers) must be in constant physical and psychological preparedness to perform their assigned tasks. That is achieved through training and practical work at fires and emergencies.

The training of smoke divers is carried out in stationary and mobile training complexes. In addition, the software can be applied for smoke diver testing to determine its ability to withstand the loads caused by a fire. The analysis of smoke divers testing in the garrisons of the SES of Ukraine in the western and central regions of Ukraine showed different methods and approaches to training: time indicators, training conditions, etc.

The aim of the research is to conduct experimental studies to determine the average value of vital signs: kilocalories burned, heart rate by smoke divers during operational actions that simulated operational deployment to a fire.

To achieve this goal, domestic and international sources that define the procedure for training (testing) of smoke divers were analyzed. Participants of different medical and age groups were selected for the study, exercises to simulate operational deployment to a fire and the necessary tools and equipment to determine the vital signs of smoke divers, as well as the time spent during experimental studies were determined.

On the basis of the analysis, a scheme for the frequency of practical training of smoke divers was proposed.

The article describes the procedure for the operational actions of a fire and rescue department on a tanker truck, simulating exercises to perform operational deployment, namely:

- operational deployment of the department with the supply of two hand-held fire hoses with the laying of the main line for three hoses with a diameter of 77 mm and two working lines (two hoses with a diameter of 51 mm) with the installation of a tanker truck on a fire hydrant;
- removal, transfer, installation and climbing up the retractable three-knee ladder to the window of the 3rd floor of the training tower;
- climbing and descending the staircase of a 9-storey building.

As a result of the conducted research, it was found that the average value in six medical and age groups was: the number of kilocalories burned (kcal) – 127; heart rate (bpm) – 168; exercise time (s) – 495. The results obtained will be taken into account during the development of software for conducting classes on training trails and simulators, which will provide an opportunity to test smoke divers of different medical and age groups under close to real fire conditions with the issuance of a test certificate, which will indicate their vital signs based on their work in open-circuit compressed air self-contained breathing apparatus.

Key words: testing of gas and smoke protection, operational deployment, heart rate, kilocalories.

Постановка проблеми. В умовах воєнного стану в Україні робота пожежних-рятувальників (далі – газодимозахисників) є однією з найбільш небезпечних професій, тому кожен газодимозахисник Державної служби України з надзвичайних ситуацій (далі – ДСНС України) повинен бути готовий до виконання завдань за призначенням [1]. Як показує практика, кожна шоста сьома пожежа в Україні ліквідовувалась у складі ланки газодимозахисної служби (далі – ГДЗС).

Роботу газодимозахисників в умовах небезпечних чинників пожежі регламентує нормативна документація, яка визначає організаційний порядок, гасіння пожеж ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, рятування людей та матеріальних цінностей. Сучасні інноваційні технології повинні стосуватися усіх галузей людської діяльності, в тому числі порядку професійної підготовки особового складу ДСНС України. Інтенсивний стан розвитку усіх галузей людської діяльності в епоху

глобальних соціально-економічних перетворень вимагає від фахівців галузі пожежної та техногенної безпеки високого рівня професійної підготовки та постійного підтримання їх у готовності. Саме тому удосконалення методів та технічних засобів підготовки газодимозахисників до дій за призначенням є актуальним [2–5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Тренування газодимозахисників країн Європейського Союзу проводяться в сучасних тренувальних комплексах стаціонарного та мобільного типів. Також за допомогою програмного забезпечення може відбуватись тестування газодимозахисника задля визначення його можливості виконання навантажень, які відповідають умовам пожежі.

Нині в навчальних закладах ДСНС України та на базі багатьох ГУ ДСНС України створено тренувальні стежки та лабіринти з різними підходами та методиками до тренування на них. Наявне програмне забезпечення, яке є в Україні для тренування газодимозахисників (MAW-Contaneranlage), також у теплодимокамері ГУ ДСНС України в Івано-Франківській області трактують різні підходи до тренувань: часові показники, умови проведення тренувань, вправи тощо (рис. 1) [6].



Рис. 1. Проведення тренувань газодимозахисників у тренувальному комплексі MAW-Contaneranlage

Відповідно, є необхідність проведення експериментальних досліджень життєвих показників газодимозахисників (частоти серцевих скорочень, витрачених кілокалорій) під час проведення оперативних дій на пожежі (рятування людей і евакуація майна, оперативного розгортання, гасіння пожежі, виконання спеціальних робіт). Наступним аспектом наукової складової частини є обґрунтування необхідного часу виконання вправ та часу на основі експериментальних та теоретичних досліджень. Дані експериментальні дослідження дають змогу обґрунтувати життєві

показники газодимозахисників та час для тестувань на тренувальних стежках з використанням розробленого програмного забезпечення.

Мета статті (постановка завдання). Метою експериментальних досліджень було визначення середнього значення життєвих показників, як-от кількість спалених калорій, частота серцевих скорочень газодимозахисника та часу виконання оперативних дій, що імітували оперативне розгортання на пожежі.

Для досягнення мети потрібно вирішити такі завдання:

- вибрати учасників та сформувати групи, які будуть брати участь у дослідженнях відповідно до медико-вікових груп;
- вибрати вправи для виконання оперативних дій відділенням, що імітують оперативне розгортання на пожежі;
- за допомогою необхідного оснащення та обладнання визначити життєві показники газодимозахисників під час оперативного розгортання на пожежі та витрачений час для його виконання.
- опрацювати результати експериментальних досліджень.

Виклад основного матеріалу. Відповідно до відомчих керівних документів газодимозахисники, які допущені до роботи в засобах індивідуального захисту органів дихання, а саме в апаратах автономного дихання стисненим повітрям з відкритим контуром, зобов'язані постійно вдосконалювати свої навички в системі службової підготовки. Практичні заняття з газодимозахисниками повинні проводитись протягом календарного року за визначеною методикою проведення практичних занять із газодимозахисниками: на свіжому повітрі – один раз на місяць, у теплодимокамерах, теплокамерах, димокамерах, на полігонах, смугах психологічної підготовки і навчально-тренувальних комплексах ГДЗС – один раз на рік [2; 3]. Безумовно, якщо провести аналіз кількості занять на свіжому повітрі, цього цілком достатньо для вдосконалення вмінь та навичок газодимозахисників. При цьому основний акцент підготовки (тренувань) газодимозахисників має відбуватись в умовах, максимально наближених до реальних умов пожежі, як-от велика концентрація продуктів горіння (диму), висока температура, підвищена вологість. Тренування в теплодимокамері і в навчально-тренувальних комплексах ГДЗС для здобувачів вищої освіти навчальних закладів сфери ДСНС України проводиться один раз на рік, що є недостатнім для підтримання їхньої психологічної готовності до дій в екстремальних ситуаціях, підвищення адаптації організму до надмірних теплових навантажень, адже такі тренування сприяють збереженню

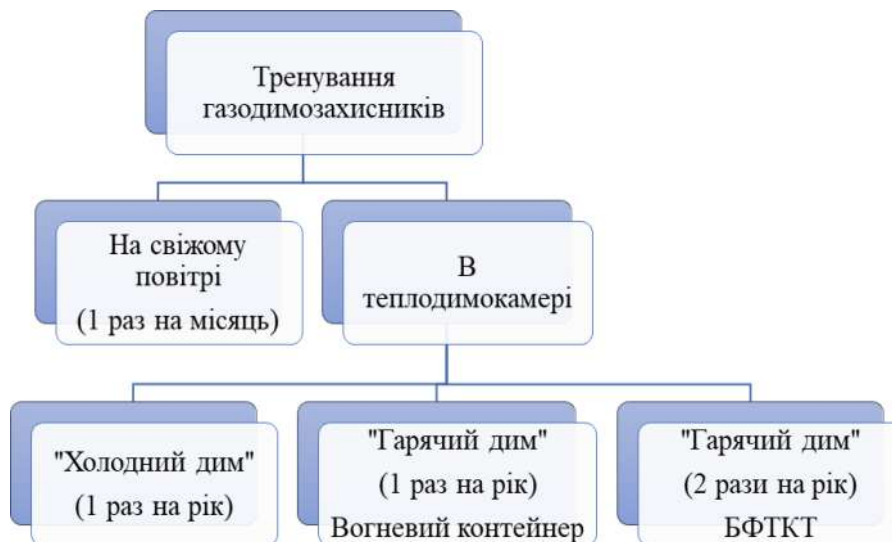


Рис. 2. Періодичність проведення тренувань газодимозахисників

необхідного рівня працездатності газодимозахисників в не придатному для вихання середовищі під впливом високої температури та вологості. Незначна кількість викликів та час роботи в ЗІЗОД окремих пожежно-рятувальних підрозділів зумовлює необхідність перегляду та вдосконалення підходу до підготовки газодимозахисників в умовах сьогодення. Зокрема, слід враховувати воєнний стан, наявну матеріально-технічну базу ГДЗС. На рис. 2 наведена запропонована періодичність проведення тренувань газодимозахисників.

Для формування груп учасників експериментального дослідження було проведено опитування особового складу Львівського державного університету безпеки життєдіяльності, відповідно до шести медико-вікових груп зроблено їх відбір. У відділення підбирались учасники з різними антропологічними даними (зростом та вагою). Було сформовано 6 відділень по 4 учасники в кожному. Загальна кількість учасників склала 24 особи.

Для виконання оперативних дій відділенням, що імітували оперативне розгортання на пожежі було вибрано такі вправи [8–10]:

- оперативне розгортання відділення з подачею двох ручних пожежних стволів з прокладанням магістральної лінії на три рукави діаметром 77 мм та двох робочих ліній (по два рукави діаметром 51 мм кожна) з установкою автоцистерни на пожежний гідрант;
- зняття, перенесення, встановлення і підйом по висувній триколінній драбині у вікно 3-го поверху навчальної башти;
- підйом та спуск маршевыми сходами 9-поверхової будівлі.

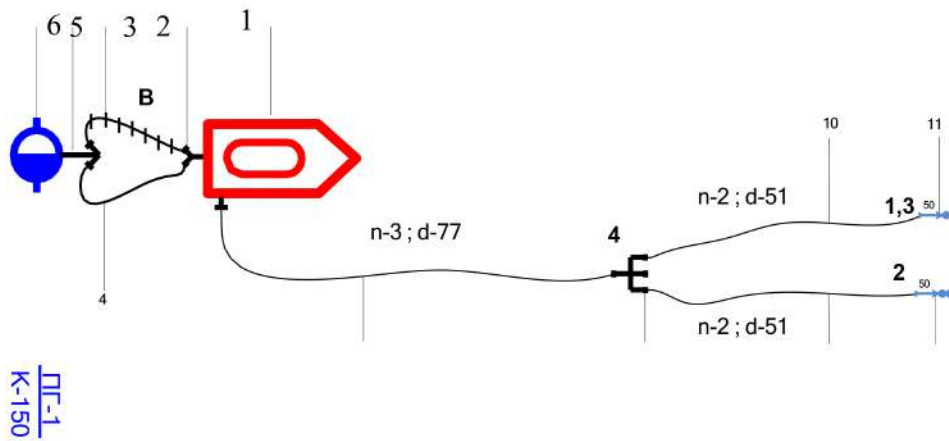
Всі вправи учасниками виконувались у захисному одязі та спорядженні та з апаратом на

стисненому повітрі без включення в нього (розташовувався на спині) з дотриманням вимог правил безпеки праці [11]. Під час експериментальних досліджень життєві показники учасників (газодимозахисників) (частота серцевих скорочень, витрачені кілокалорії) фіксувались за допомогою смартгодинників з функціями відстежування життєвих показників та нагрудних пульсометрів, які синхронізувались між собою. Час виконання вправ під час експериментальних досліджень фіксувався секундоміром. Перед початком виконання вправ залучались працівники медико-санітарної частини для визначення показників артеріального тиску й сатурації крові до та після проведення експериментального дослідження (рис. 3).



Рис. 3. Визначення показників артеріального тиску та сатурації крові

Для виконання вправи № 1 використовувалась пожежна автоцистерна АЦ-4-60 (5309)-505М, укомплектована відповідно до табеля належності пожежно-технічним та аварійно-рятувальним



7 8

9

12

Рис. 4. Вправа № 1: схема оперативного розгортання відділення з подачею 2-х ручних пожежних стволів та встановленням пожежної автоцистерни на пожежний гідрант: 1 – пожежна автоцистерна (АЦ); 2 – водозбірник рукавний; 3 – рукав пожежний напірно-всмоктувальний, $d = 77$ мм; 4 – рукав пожежний напірний (4-метровий), $d = 77$ мм; 5 – колонка пожежна; 6 – пожежний гідрант № 1, водопровід кільцевий, $d = 150$ мм; 7 – магістральна лінія, $d = 77$ мм; 8 – розгалуження рукавне триходове РТ-80; 9, 10 – робочі рукавні лінії, $d = 51$ мм; 11 – ручний ствол для формування компактного водяного струменя РСК-Протек-366; 12 – ручний ствол для формування розпиленого водяного струменя РСК-Протек-366

обладнанням; захисний одяг та спорядження, апарати на стисненому повітрі.

Перед початком експериментального дослідження відділення виконує вправи почергово і розташовується в кабіні автомобіля. Вправа № 1 виконувалась відповідно до схеми оперативного розгортання відділення з подачею 2-х ручних пожежних стволів та встановленням пожежної автоцистерни на пожежний гідрант, як показано на рис. 4.

За командою учасники експерименту запускають смартгодинники для зчитування життєвих показників та починають виконувати вправу в такій послідовності: пожежний-рятувальник № 1 прокладає робочу лінію з рукавів $d = 51$ мм, приєднує ствол та виходить на позицію ствольника. Пожежний-рятувальник № 2 прокладає робочу лінію з рукавів $d = 51$ мм, приєднує ствол та виходить на позицію ствольника. Пожежний-рятувальник № 3 прокладає магістральну лінію з 3 (трьох) рукавів $d = 77$ мм,

переносить і встановлює розгалуження, працює підствольником в пожежного-рятувальника № 1. Пожежний-рятувальник № 4 разом з водієм встановлює АЦ на ПГ, під'єднує магістральну лінію до напірного патрубку, допомагає пожежному-рятувальнику № 3 прокладати магістральну лінію та працює на розгалуженні. На рис. 5 показані етапи оперативного розгортання відділення з подачею 2-х ручних пожежних стволів та встановленням пожежної автоцистерни на пожежний гідрант.

Після завершення проведення оперативного розгортання учасники експериментального дослідження зупиняють зчитування життєвих показників на смартгодиннику. Дані заносяться у діаграми життєвих показників учасників експериментального дослідження після проведення вправи № 1 по кожній медико-віковій групі, як показано на рис. 6.

На рис. 7 показано діаграму, де зведено середнє значення життєвих показників учасників шести медико-вікових груп після виконання вправи № 1.



Рис. 5. Виконання вправи № 1

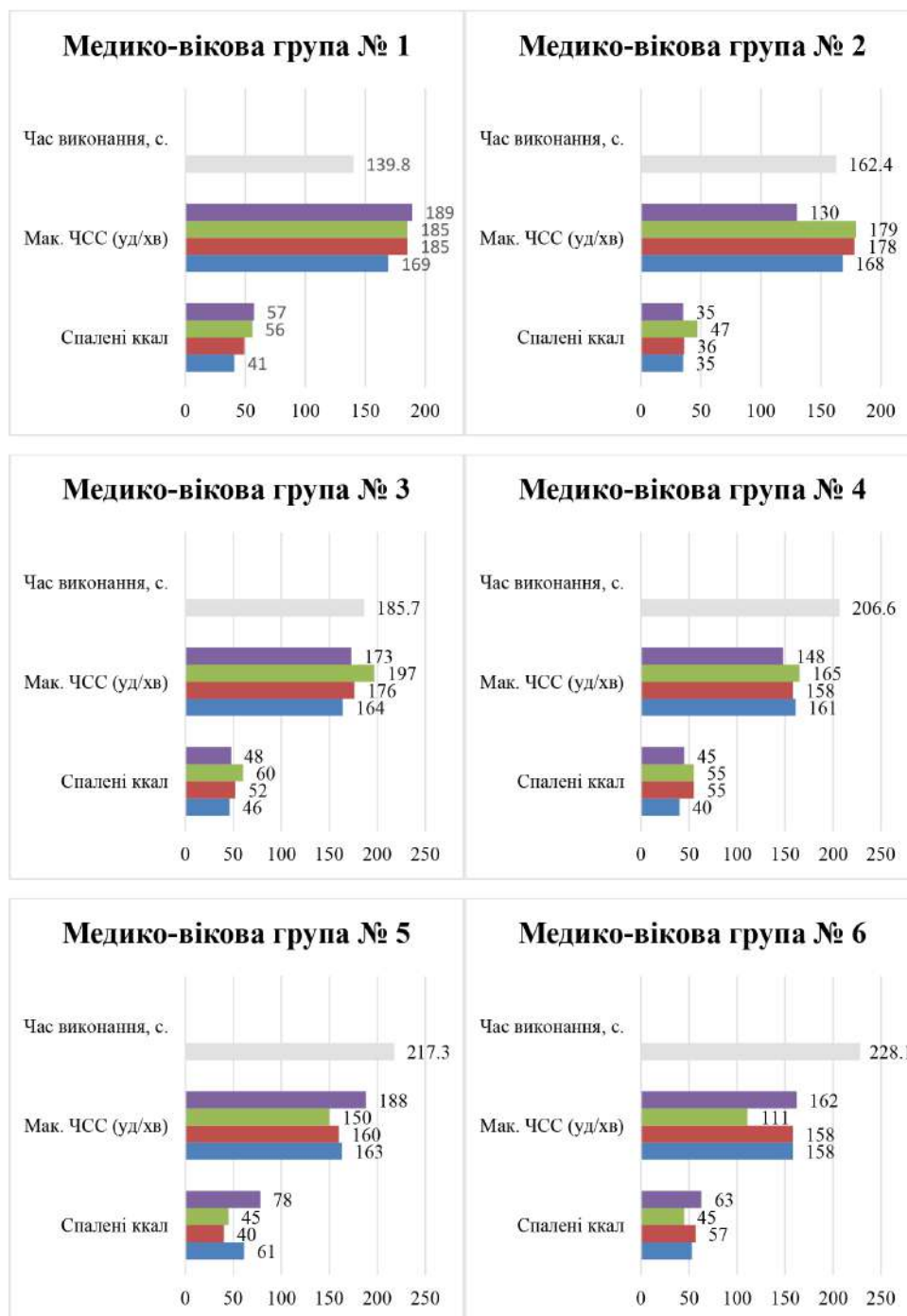


Рис. 6. Діаграми життєвих показників учасників шести медико-вікових груп після виконання вправи № 1

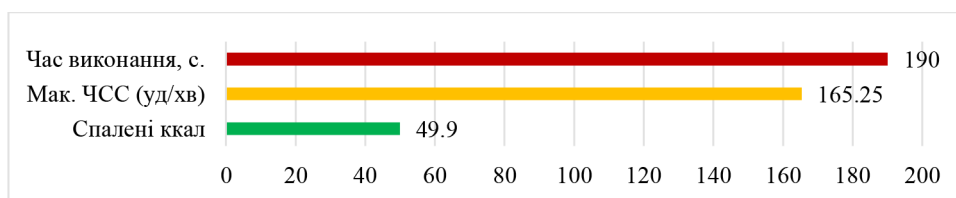


Рис. 7. Діаграма середнього значення життєвих показників учасників шести медико-вікових груп після виконання вправи № 1

Для виконання вправи № 2 використовувались пожежна автоцистерна АЦ-4-60 (5309)-505М, укомплектована відповідно до табеля належності пожежно-технічним та аварійно-рятувальним

обладнанням; захисний одяг та спорядження; апарати на стисненому повітрі; смартгодинники з функціями відстежування життєвих показників; нагрудні пульсометри.

Перед початком експериментального дослідження кожне відділення виконує вправу почергово і розташовується напроти осі задніх коліс автомобіля.

За командою учасники експерименту запускають смартгодинники для зчитування життєвих

показників та починають виконувати вправу в такій послідовності: пожежний-рятувальник № 3 підіймається на пожежну автоцистерну, пожежний-рятувальник № 4 знімає з кріплень висувну драбину та разом з пожежним-рятувальником № 3 подає її пожежному-рятувальнику



Рис. 8. Виконання вправи № 2

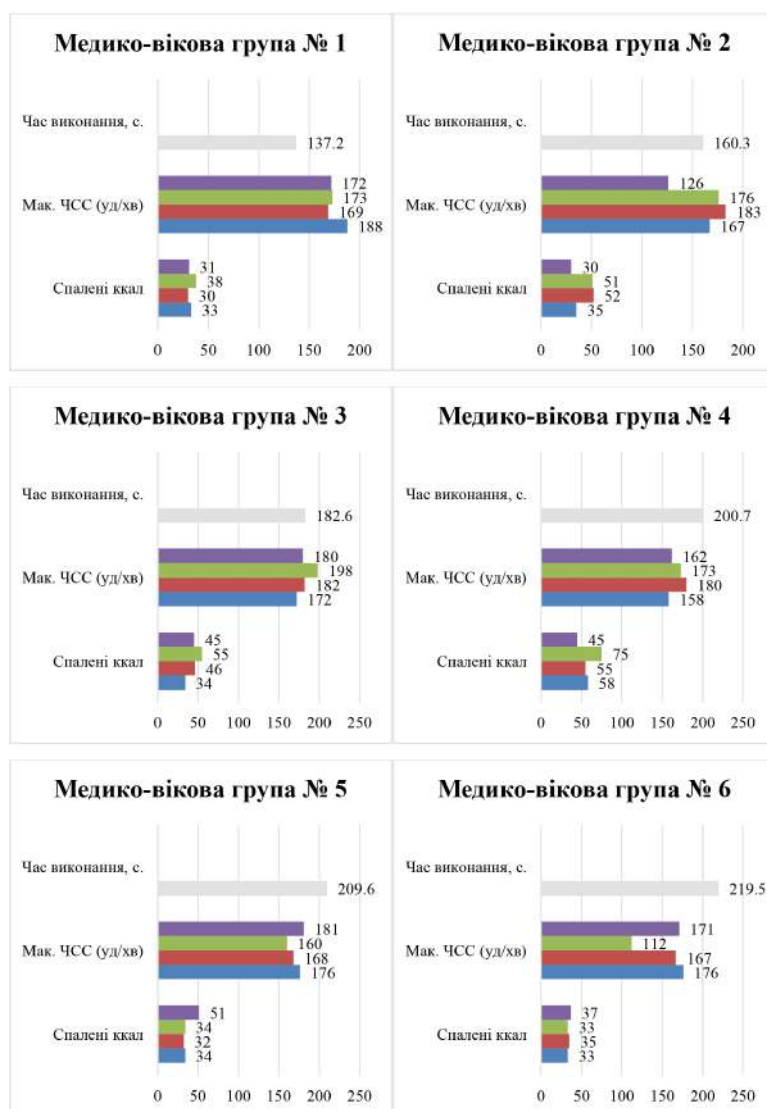


Рис. 9. Діаграми життєвих показників учасників шести медико-вікових груп після виконання вправи № 2

№ 1 та пожежному-рятувальнику № 2. Пожежний-рятувальник № 1 та № 2 встановлюють висувну драбину у вікно 3-го поверху, після чого пожежні-рятувальники № 1, № 3 та № 4 починають почерговий підйом у вікно 3-го поверху. На рис. 8 показані етапи виконання вправи № 2.

Після завершення підйому у вікно 3-го поверху навчальної башти учасники експериментального дослідження зупиняють зчитування життєвих показників на смартгодиннику. Дані заносяться у діаграми життєвих показників учасників експериментального дослідження після проведення вправи № 2 по кожній медико-віковій групі, як показано на рис. 9.

На рис. 10 показано діаграму, де зведено середнє значення життєвих показників учасників шести медико-вікових груп після виконання вправи № 2.

Для виконання вправи № 3 необхідні захисний одяг та спорядження, апарати на стисненому повітрі, смартгодинники з функціями відстежування життєвих показників, нагрудні пульсометри та пожежні рукави діаметром 77 мм.

Перед початком експериментального дослідження кожне відділення виконує вправу почергово і розташовується перед входом у 9-поверхову будівлю.

За командою учасники експериментального дослідження запускають смартгодинники для зчитування життєвих показників та починають виконувати підйом на 9-й поверх з пожежним рукавом, складеним в подвійну скатку. На рис. 11 показані етапи виконання вправи № 3.

Після завершення підйому на 9-й поверх учасники експериментального дослідження зупиняють зчитування життєвих показників на смартгодиннику. Дані заносяться у діаграми життєвих показників учасників експериментального дослідження після проведення вправи № 3 по кожній медико-віковій групі, як показано на рис. 12.

На рис. 13 показано діаграму, де зведено середнє значення життєвих показників учасників шести медико-вікових груп після виконання вправи № 3.

Якщо проаналізувати середню кількість спалених кілокалорій (ккал), частоти серцевих скорочень (уд/хв) та середній час (с) виконання вправ газодимозахисниками в ході експериментальних досліджень, ми отримаємо значення, які наведені в табл. 1.

Дані табл. 1 зведено у діаграму життєвих показників всіх учасників експериментального дослідження після виконання трьох вправ, як показано на рис. 14.

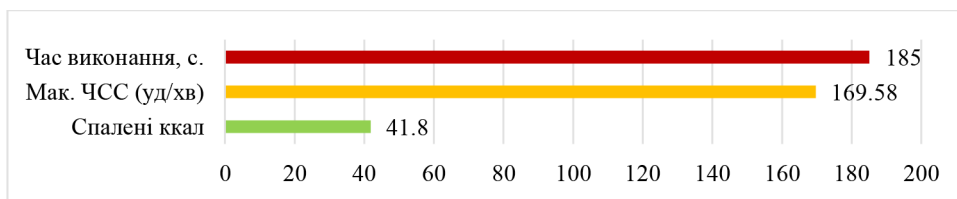


Рис. 10. Діаграма середнього значення життєвих показників учасників шести медико- вікових груп після виконання вправи № 2



Рис. 11. Виконання вправи № 3

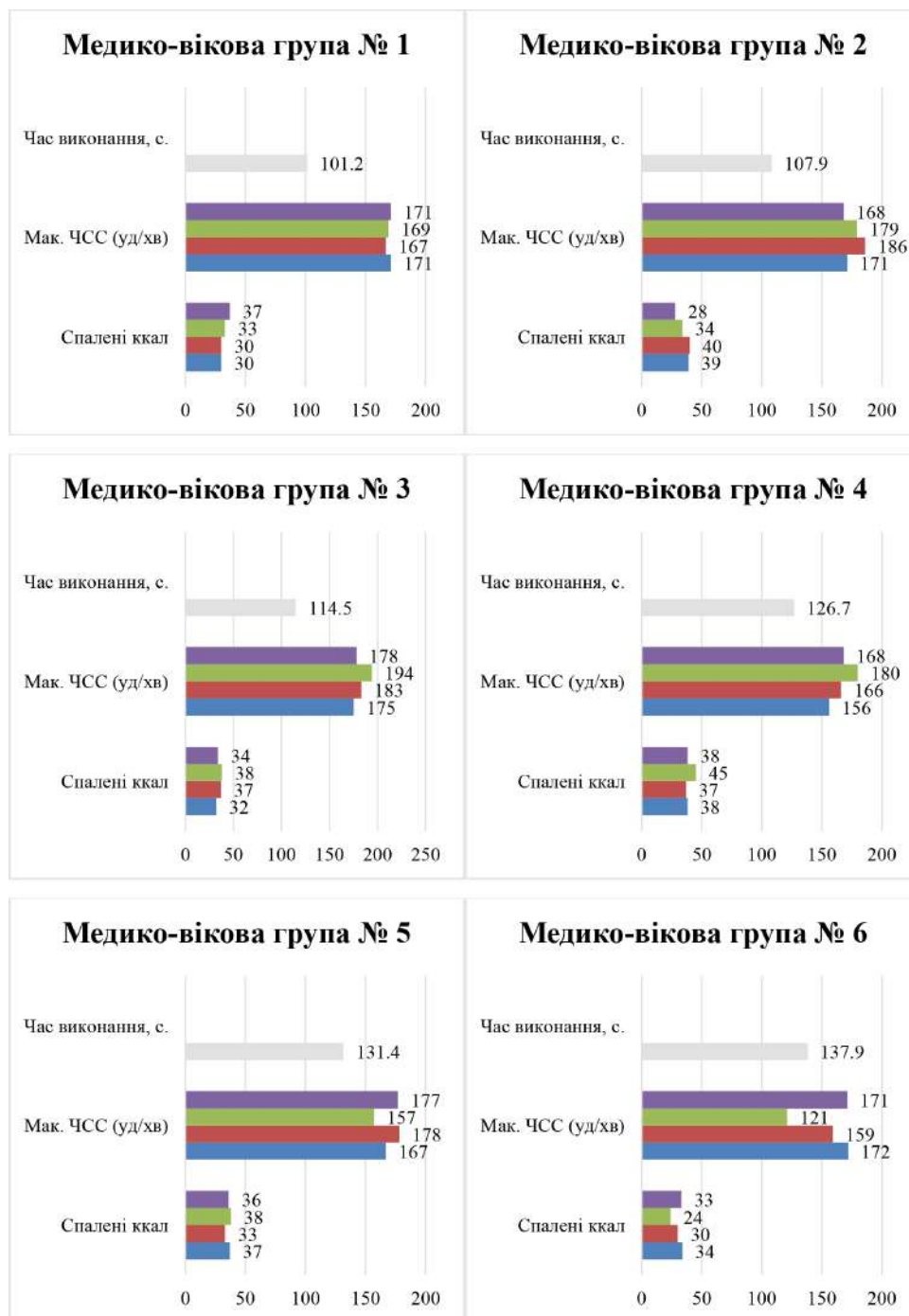


Рис. 12. Діаграми життєвих показників учасників шести медико-вікових груп після виконання вправи № 3

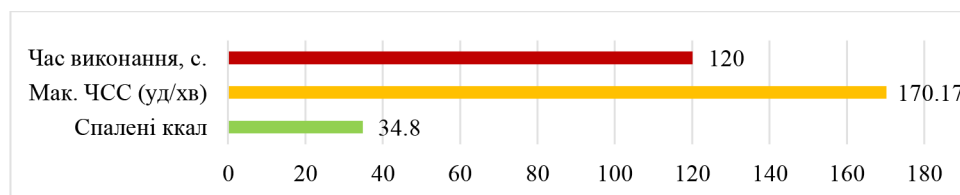


Рис. 13. Діаграма середнього значення життєвих показників учасників шести медико-вікових груп після виконання вправи № 3

Отже, отримані дані життєвих показників учасників шести медико-вікових груп після виконання трьох вправ згодом будуть використані для складання технічного завдання та розроблення

програмного забезпечення щодо тестування газодимозахисників різних медико-вікових груп в умовах, максимально наближених до реальної пожежі з відповідним навантаженням.

Середні значення спалених кілокалорій, частоти серцевих скорочень та часу виконання вправ

№ вправи	Кількість спалених кілокалорій (ккал)	Середня ЧСС (уд/хв)	Час виконання вправ (с)
1	50	166	190
2	42	167	185
3	35	171	120

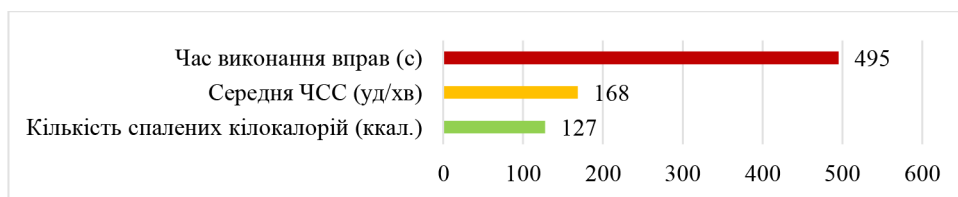


Рис. 14. Діаграма середніх значень життєвих показників учасників шести медико-вікових груп після виконання трьох вправ

Висновки. На підставі викладеного пропонується змінити періодичність та кількість практичних занять для тренувань газодимозахисників ДСНС України в умовах, максимально наближених до реальних умов пожежі, а саме на багатофункціональному тренажері та вогневому модулі, з огляду на європейський досвід та воєнний стан в Україні.

Отримані результати експериментальних досліджень слід врахувати під час розроблення програмного забезпечення для проведення занять із газодимозахисниками пожежно-рятувальних підрозділів системи ДСНС України на тренувальних стежках і тренажерах, що дасть змогу тестувати газодимозахисників різних медико-вікових груп в умовах, максимально наближених до реальної пожежі (НС), з видачею свідоцтва про тестування із зазначенням відповідних життєво важливих показників, які, як встановлено, залежать від медико-вікових груп, та оцінкою рівня підготовки до роботи в апаратах автономного дихання стисненим повітрям з відкритим контуром.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Про особливості реагування на надзвичайні ситуації під час збройної агресії: Наказ ДСНС України від 2 квітня 2024 року № 375.
2. Про затвердження порядку організації роботи органів управління та підрозділів, закладів освіти системи ДСНС під час підготовки особового складу, гасіння пожеж, ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій та інших небезпечних подій в умовах екстремальних температур, задимленості, загазованості, радіоактивного, хімічного забруднення та біологічного зараження: Наказ МВС України від 25 вересня 2023 року № 780.
3. Про затвердження методичних рекомендацій з підготовки газодимозахисників ДСНС України: Наказ ДСНС України від 27 червня 2024 року № 680.
4. Про затвердження Статуту дій у надзвичайних ситуаціях органів управління та підрозді-

лів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту та Статуту дій органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту під час гасіння пожеж: Наказ МВС від 26 квітня 2018 року № 340 зі змінами, внесеними згідно з Наказами Міністерства внутрішніх справ від 18 жовтня 2021 року № 768, від 18 квітня 2024 року № 251.

5. Довідник керівника гасіння пожежі / Український науково-дослідний інститут цивільного захисту. Київ: ТОВ «Літера-Друк», 2016. 320 с.

6. Луц В. І., Гузар Н. І. Дослідження ефективності тестування газодимозахисників ДСНС України. *Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції «Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення»*. 2024. С. 122–124.

7. Про затвердження Порядку організації службової підготовки осіб рядового і начальницького складу служби цивільного захисту: Наказ Міністерства внутрішніх справ України від 15 травня 2017 року № 511.

8. Про затвердження Змін до Порядку організації службової підготовки осіб рядового і начальницького складу служби цивільного захисту: Наказ Міністерства внутрішніх справ України від 12 червня 2023 року № 480.

9. Луц В. І., Чалий Д. О., Великий Я. Б. Основи підготовки пожежно-рятувальника: навчальний посібник. Львів : Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 2022. 456 с.

10. Про затвердження Правил безпеки праці в органах і підрозділах МНС: Наказ МНС України від 7 травня 2007 року № 312.

11. Луц В. І., Пархоменко Р. В., Луц І. В. Аналіз підготовки газодимозахисників ДСНС України та шляхи підвищення її ефективності. *Пожежна безпека*. 2017. № 29.

REFERENCES

1. DSNS Ukrainy. (2024, April 2). Pro osoblyvosti reahuvannya na nadzvychnaii sytuatsii pid chas zbroinoi ahresii [On the specifics of response to emergencies

during armed aggression] (Nakaz No. 375). [in Ukrainian].

2. MVS Ukrainy. (2023, September 25). Pro zatverdzhennia poriadku orhanizatsii roboty orhaniv upravlinnia ta pidrozdiliv, zakladiv osvity systemy DSNS pid chas pidhotovky osobovoho skladu, hasinnia pozhezh, likvidatsii naslidkiv nadzvychainykh sytuatsii ta inshykh nebezpechnykh podii v umovakh ekstremalnykh temperatur, zadymlenosti, zahazovanosti, radioaktyvnoho, khimichnoho zabrudnennia ta biolohichnoho zarazhennia [On approval of the procedure for organizing the work of management bodies and units, educational institutions of the SES system during training, fire extinguishing, emergency response in extreme conditions] (Nakaz No. 780). [in Ukrainian].

3. DSNS Ukrainy. (2024, June 27). Pro zatverdzhennia metodychnykh rekomendatsii z pidhotovky hazodymozakhysnykiv DSNS Ukrainy [On approval of methodological recommendations for the training of SES gas and smoke protection specialists] (Nakaz No. 680). [in Ukrainian].

4. MVS Ukrainy. (2018, April 26). Pro zatverdzhennia Statutu dii u nadzvychainykh sytuatsiiakh orhaniv upravlinnia ta pidrozdiliv Operatyvno-riatuvalnoi sluzhby tsyvilnoho zakhystu ta Statutu dii orhaniv upravlinnia ta pidrozdiliv Operatyvno-riatuvalnoi sluzhby tsyvilnoho zakhystu pid chas hasinnia pozhezh [On the approval of the Charter of Actions in Emergency Situations and the Charter of Actions during Firefighting of the Civil Protection Rescue Service] (Nakaz No. 340, with amendments No. 768/2021, No. 251/2024). [in Ukrainian].

5. Ukrainskyi naukovo-doslidnyi instytut tsyvilnoho zakhystu. (2016). Dovidnyk kerivnyka hasinnia pozhezhi [Firefighting Commander's Handbook]. Kyiv: TOV "Litera-Druk". [in Ukrainian].

6. Lushch, V.I., & Huzar, N.I. (2024). Doslidzhennia efektyvnosti testuvannia hazodymozakhysnykiv

DSNS Ukrainy [Study of the effectiveness of testing SES gas and smoke protection specialists]. Zbirnyk tez dopovidei Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii "Aktualni problemy pozhezhnoi bezpeky ta zapobihannia nadzvychainym sytuatsiiam v umovakh sohodennia" [Conference Proceedings: Current Issues of Fire Safety and Prevention of Emergencies in Modern Conditions], 122–124. [in Ukrainian].

7. Ministerstvo vnutrishnikh sprav Ukrainy. (2017, May 15). Pro zatverdzhennia Poriadku orhanizatsii sluzhbovoi pidhotovky osib riadovoho i nachalnytskoho skladu sluzhby tsyvilnoho zakhystu [On approval of the procedure for organizing professional training of civil protection service personnel] (Nakaz No. 511). [in Ukrainian].

8. Ministerstvo vnutrishnikh sprav Ukrainy. (2023, June 12). Pro zatverdzhennia Zmin do Poriadku orhanizatsii sluzhbovoi pidhotovky osib riadovoho i nachalnytskoho skladu sluzhby tsyvilnoho zakhystu [On the approval of amendments to the procedure for professional training of civil protection service personnel] (Nakaz No. 480). [in Ukrainian].

9. Lushch, V. I., Chalyi, D. O., & Velykyi, Ya. B. (2022). Osnovy pidhotovky pozhezhnoho-riatuvalnyka [Fundamentals of firefighter-rescuer training]. Lviv: Lvivskyi derzhavnyi universytet bezpeky zhyttiediialnosti. [in Ukrainian].

10. MNS Ukrainy. (2007, May 7). Pro zatverdzhennia Pravyl bezpeky pratsi v orhanakh i pidrozdilakh MNS [On the approval of labor safety rules in MNS bodies and units] (Nakaz No. 312). [in Ukrainian].

11. Lushch, V.I., Parkhomenko, R. V., & Lushch, I. V. (2017). Analiz pidhotovky hazodymozakhysnykiv DSNS Ukrainy ta shliakhy pidvyshchennia ii efektyvnosti [Analysis of the training of SES gas and smoke protection specialists and ways to improve its effectiveness]. Pozhezhna bezpeka – Fire Safety, (29). [in Ukrainian].

© В. І. Лушч, Р. М. Конанець, Я. Б. Великий, Р. С. Ткаченко, Н. І. Гузар

Науково-методична стаття

Надійшла до редакції 07.03.2025

Прийнято до публікації 04.06.2025



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.46.2025.09>

В. С. Мирошкін, М. З. Пелешко, Вол. В. Ковалишин, І. С. Грідасов
*Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
м. Львів, Україна*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3907-6945> – В. С. Мирошкін
<https://orcid.org/0000-0002-9315-1590> – М. З. Пелешко
<https://orcid.org/0000-0003-3739-8668> – Вол. В. Ковалишин
<https://orcid.org/0009-0009-6671-8799> – І. С. Грідасов
✉ miroxa11@ukr.net

НОРМАТИВНО-ПРАВОВЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ ПОХИЛИХ ПІДЙОМНИКІВ ДЛЯ ЕВАКУЮВАННЯ ЛЮДЕЙ В РАЗІ ПОЖЕЖІ

Проблема. У статті розглянуто питання забезпечення інклюзивності шляхів евакуації на діючих об'єктах в Україні. Аналіз чинного законодавства та практики свідчить про недостатню увагу до потреб людей з інвалідністю під час проектування та експлуатації будівель.

Мета роботи та задачі полягають у дослідженні використання похилих підйомників для осіб з інвалідністю в будівлях та спорудах в Україні; порівнянні українського законодавства з міжнародними стандартами; аналізі ефективності чинних норм та пропозицій щодо їх удосконалення.

Методи досліджень. Статистичний, аналітичний, порівняльний.

Основні результати дослідження. Особливу увагу приділено проблемі використання похилих підйомників, які часто встановлюються з порушеннями норм пожежної безпеки та створюють додаткові ризики під час евакуації.

Дослідження виявило, що наявні нормативи не завжди чітко визначають правила використання похилих підйомників та не враховують всіх аспектів безпеки. Крім того, відсутній ефективний контроль за дотриманням вимог доступності та пожежної безпеки.

На основі проведеного аналізу сформульовано низку пропозицій щодо покращення ситуації, зокрема удосконалення нормативної бази, підвищення обізнаності учасників будівельного процесу та балансоутримувачів, посилення контролю за дотриманням вимог доступності та розроблення альтернативних рішень для забезпечення безпечної евакуації людей з інвалідністю.

Висновки. Проблема забезпечення інклюзивності шляхів евакуації є комплексною і вимагає системного підходу. Необхідне розроблення заходів, які дадуть змогу підвищити безпеку та комфорт для всіх категорій населення. Такими заходами можуть бути удосконалення нормативної бази через розроблення національних стандартів, які регламентуватимуть вимоги до пожежної безпеки під час використання похилих підйомників.

Ключові слова: інклюзивність, шляхи евакуації, люди з інвалідністю, похилі підйомники, пожежна безпека, нормативна база, доступність.

V. S. Myroshkin, M. Z. Peleshko, V. V. Kovalishyn, I. S. Gridasov
*Lviv State University of Life Safety
Lviv, Ukraine*

REGULATORY AND LEGAL PROVISION OF SAFETY WHEN USING INCLINED LIFTS FOR EVACUATION OF PEOPLE IN THE EVENT OF FIRE

Problem. The article addresses the issue of ensuring inclusive evacuation routes in existing buildings in Ukraine. An analysis of current legislation and practices reveals insufficient attention to the needs of persons with disabilities during the design and operation of buildings.

Objective and tasks. The goal of this work is to examine the use of inclined platform lifts for persons with disabilities in buildings and structures in Ukraine, compare Ukrainian legislation with international standards, analyze the effectiveness of current regulations, and propose improvements.

Research methods. Statistical, analytical, and comparative methods.

Research results. Special attention is given to the issue of inclined platform lifts, which are often installed in violation of fire safety regulations and create additional risks during evacuation. The research shows that current regulations do not always clearly define the rules for using inclined lifts and often overlook important safety considerations. Furthermore, there is a lack of effective oversight regarding compliance with accessibility and fire safety requirements.

Based on the conducted analysis, a set of proposals was developed to improve the situation, including: enhancing the regulatory framework, raising awareness among construction stakeholders and facility managers, strengthening control over compliance with accessibility requirements, and developing alternative solutions to ensure the safe evacuation of persons with disabilities.

Conclusions. The problem of ensuring inclusive evacuation routes is complex and requires a systemic approach. It is necessary to develop measures aimed at improving safety and comfort for all population groups. Such measures may include the improvement of regulatory frameworks through the development of national standards that define fire safety requirements for the use of inclined platform lifts.

Key words: inclusivity, evacuation routes, persons with disabilities, inclined platform lifts, fire safety, regulatory framework, accessibility.

Постановка проблеми. Необхідність забезпечення інклюзивності будівель та споруд є питанням, актуальним у всьому світі. Зокрема, в Україні за останніми даними [1, с. 1] налічується 3 мільйони осіб з інвалідністю, не враховуючи інших маломобільних груп. В період 2022–2023 років в Україні кількість людей з інвалідністю збільшилась на 300 000 осіб.

Право на інклюзію в Україні гарантується Конституцією України [2, с. 2], яка гарантує рівні права та свободи для всіх громадян, включно з людьми з інвалідністю, та забороняє дискримінацію за будь-якою ознакою.

Це створює фундамент для розвитку законодавства, що забезпечує інклюзивність. Законом України «Про основи соціальної захищеності осіб з інвалідністю в Україні» [3, с. 2] встановлюються загальні принципи забезпечення доступності для людей з інвалідністю, зокрема доступність будівель, споруд, транспорту, інформації та комунікацій [4; 5]. Також Україна є учасницею Конвенції ООН [6, с. 3] про права інвалідів, яка встановлює міжнародні стандарти щодо забезпечення прав людей з інвалідністю, включно з доступністю, та, відповідно до Угоди про асоціацію з ЄС, повинна гармонізувати своє законодавство з європейськими стандартами, зокрема сферу доступності.

Для забезпечення зазначених вимог та на виконання Указу президента України [7, с. 1] розроблено Національну стратегію із створення безбар'єрного простору в Україні на період до 2030 року [8, с. 8]. Одними з її основних завдань визначено актуалізацію наявної нормативної бази щодо забезпечення фізичної доступності для гармонізації на національному рівні та приведення у відповідність з міжнародними стандартами, а також розроблення нормативних документів

щодо влаштування доступності, а саме типових рішень щодо наявної забудови, окремих споруд.

Проблема забезпечення інклюзивності на вже діючих об'єктах є важливим та складним завданням. Проблема полягає в тому, що багато наявних будівель та споруд не були спроектовані з урахуванням потреб людей з інвалідністю.

Зокрема, це стосується інклюзивності шляхів евакуації. Проблемним є питання забезпечення можливості безпечної евакуації на діючих об'єктах для всіх категорій населення, зокрема людей з обмеженими фізичними можливостями, дітей, літніх людей.

Огляд останніх досліджень і публікацій. Питанням інклюзивності шляхів евакуації займалась велика кількість авторів в Україні та світі. Авторами [8–10] вивчалися питання забезпечення евакуації людей висотних будівель, зокрема проводилися розрахунки часу евакуації людей з інвалідністю з різних будівель та моделювання руху людських потоків. Проводилися практичні тренування та вивчення дій людей похилого віку під час пожежі. Притому автори зазначають, що питання впливу евакуації людей з інвалідністю на загальну евакуацію людей з будівлі не є повністю дослідженим [9, с. 17].

Авторами [11, с. 17] проведено аналіз забезпечення евакуації з будівель в Україні. Вони дійшли до висновків, що вказують на дуже низьку забезпеченість шляхів евакуації. Евакуація маломобільних груп населення часто ускладнена, а подекуди неможлива, особливо в умовах пожежі. Це проявляється у відсутності пандусів, вузьких дверних прорізів, відсутності тактильної плитки тощо. Часто зустрічаються конструктивні елементи, які ускладнюють евакуацію людей. Це можуть бути вузькі сходи, відсутність ліфтів, нерівні поверхні тощо.

При цьому автори зазначають, що у будівлях використовуються «розумні» пристосування, а саме переносні апарелі, пандуси, підйомні пристрої, зокрема в разі неможливості реконструкції пам'ятки архітектури під потреби маломобільних відвідувачів. Використання таких підйомних пристроїв має низку недоліків: такий механізм займає значний простір сходової клітки та ширину сходів, не може забезпечити безперервне переміщення МГН.

Проведені дослідження евакуації різних груп мобільності з торговельно-розважального центру [12] з урахуванням потреб і часу евакуації різних категорій відвідувачів, зокрема осіб з обмеженою мобільністю, дітей, людей похилого віку, вагітних жінок. Визначено залежності швидкості руху людських потоків під час евакуації від перебування в них осіб з інвалідністю, які пересуваються на кріслах колісних, та розраховано їх щільність на різних ділянках шляху.

Розрахунок часу евакуації під час пожежі в закладах дошкільної та середньої освіти, особливо з інклюзивними групами [13–15], має низку проблемних питань, які роблять таке моделювання і планування значно складнішим, ніж у звичайних умовах.

Автори [16, с. 97] зазначають, що чинні нормативні документи, що стосуються забезпечення доступності для людей з інвалідністю, не повністю враховують аспекти забезпечення інклюзивності шляхів евакуації, особливо у військовий час.

Автори [17, с. 245–247] також говорять про недосконалість будівельних норм та пропонують під час їх перегляду внести зміни до нормативних вимог щодо інклюзивності будівель та споруд щодо удосконалення об'ємно-планувальних і конструктивних рішень з урахуванням зарубіжного досвіду щодо забезпечення доступності будівель та споруд для МГН і забезпечення належних умов для евакуації в разі пожежі.

Зокрема, автори [17, с. 245–247] піднімають питання влаштування похилих підйомників у будівлях. Так, відповідно до вимог, під час реконструкції наявних будівель їх слід облаштовувати підйомниками вздовж сходових кліток для забезпечення доступності МГН до цих будівель. На думку авторів [17, с. 245–247], під час виконання цієї вимоги виникає проблема щодо об'ємно-планувальних та конструктивних рішень будівлі, а саме: ширина наявних сходових кліток для будівель є обмеженою, і влаштування в них підйомників призводить до зменшення нормативної ширини сходових кліток, що призводить до зменшення нормативної ширини евакуаційних виходів будівлі.

Для вирішення цієї невідповідності автори пропонують проводити подальші дослідження

з урахуванням зарубіжного досвіду, зокрема Нової Зеландії.

Мета та задачі роботи: дослідження використання похилих підйомників для осіб з інвалідністю в будівлях та спорудах в Україні; порівняння українського законодавства з міжнародними стандартами; аналіз ефективності чинних норм та пропозиції щодо їх удосконалення.

Виклад основного матеріалу. Основними документами у сфері будівництва, які визначають норми щодо безпеки шляхів евакуації інклюзивних категорій людей, є ДБН В.2.2-40:2018 «Інклюзивність будівель і споруд. Основні положення» [18, с. 2], який встановлює обов'язкові вимоги до забезпечення доступності будівель та споруд для всіх категорій населення, зокрема людей з інвалідністю та маломобільних груп, та охоплює широкий спектр аспектів: від проектування входів та шляхів руху до облаштування санітарних приміщень і забезпечення інформаційної доступності та ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва» [19, с. 2], який також містить вимоги щодо забезпечення безпечної евакуації у разі пожежі всіх людей, зокрема людей з інвалідністю.

Відповідно до п. 6.3.3.1 ДБН В.2.2-40:2018, для забезпечення інклюзії житлові будівлі та громадські будівлі слід обладнувати ліфтами та підйомниками.

Такі підйомники – це механічні засоби для підйому та спуску по сходах. Колія сходового підйомника кріпиться або до сходів або до стіни на сходовому майданчику. Сходовий підйомник має платформу для крісла або інвалідного візка і, як правило, керується людиною, яка ним користується.

У п. 6.3.3.1 ДБН В.2.2-40:2018 зазначено, що такі підйомники влаштовуються згідно з вимогами нормативних документів, а також надається відповідний перелік документів, проте у цих документах відсутня інформація щодо того, у яких саме випадках дозволяється встановлення похилих сходових підйомників на сходових клітках, що слугують основними шляхами евакуації з будівлі.

З огляду на п. 7.3.22 ДБН В.1.1-7:2016 у сходових клітках, на сходах не дозволяється розміщувати обладнання, яке виступає за площину стін на висоті до 2,2 м від поверхні сходових маршів та сходових площадок. Подібні обмеження передбачені також відповідно до розд. II гл. 2 п. 2.37 НАПБ 01.001.2014 [20, с. 18], а саме: не допускається влаштовувати на шляхах евакуації пороги, виступи, турнікети, двері розсувні, підйомні, такі, що обертаються, та інші пристрої, які перешкоджають вільній евакуації людей.

Отже, з огляду на норми законодавства у сфері пожежної безпеки встановлення таких підйомників на шляхах евакуації є забороненим.

Суперечливість будівельних норм, недостатня інформованість, відсутність нагляду, контролю у сфері пожежної та техногенної безпеки через обмеження воєнного стану, фінансові обмеження спричиняють те, що на діючих об'єктах замість повноцінної реконструкції будівель для забезпечення інклюзивності шляхів евакуації впроваджуються технічні рішення, які суттєво знижують безпеку людей під час евакуації.

З відкритих джерел [21, с. 1, 16; 22, с. 1] відомо про багато випадків встановлення конструкцій похилих підйомників з грубими порушеннями вимог пожежної безпеки. Такі конструкції встановлюються у громадських закладах з масовим перебуванням людей, лікарнях, начальних закладах та укриттях (рис 1–5).

Досвід гасіння пожеж та проведення евакуації людей показує, що використання таких підйомників в умовах реальної пожежі може створити

перешкоди для людей, які евакуюються з будівлі. За виникнення таких перешкод на декількох шляхах евакуації одночасно може заблокуватись велика кількість людей в будівлі, що призведе до непоправних наслідків.

Також такі платформи є травмонебезпечними, особливо під час їх використання в дитячих дошкільних та навчальних закладах. Існує ризик самовільного розкриття та падіння платформи або заховування одягу чи частин тіла людини платформою під час руху.

Використання таких підйомників у світі суворо обмежується та регулюється законодавством. Відповідно до будівельних норм Нової Зеландії, стандарту NZS 4121:2001 [23 с. 104], сходові підйомники не повинні використовуватись як засіб забезпечення доступу. Однак вони можуть розглядатися для використання в приватних будинках.

У нормативах зазначено, що люди з інвалідністю зазвичай уникають користування сходовими підйомниками в громадських місцях, оскільки вони привертають увагу під час роботи.



Рис. 1. Встановлення похилого підйомника на шляху евакуації у закладі охорони здоров'я



Рис. 2. Встановлення похилого підйомника на шляху евакуації на об'єкті муніципальної інфраструктури



Рис. 3. Встановлення похилого підйомника на шляху евакуації дошкільному навчальному закладі



Рис. 4. Встановлення похилих підйомників на двох рівнях у загальноосвітній школі



Рис. 5. Встановлення похилого підйомника на шляху евакуації в укритті

Багато хто сприймає їх як «спеціальне пристосування для людей з інвалідністю», і вони можуть заважати іншим користувачам сходів. Також сходовий підйомник зменшує доступну ширину сходів, оскільки більшість сходів вбудовано в шляхи евакуації, що створює небезпеку. Також сходові ліфти схильні до вандалізму та зловживань у громадських місцях, вони вимагають якісного технічного обслуговування, яке часто не виконується.

Також відповідно до розд. II п. 206.7 стандартів США ADA 2010 року щодо проєктування доступності [24, с. 109], обмежуються місця використання похилих сходових підйомників. Їх використання дозволено лише у приватних будинках, зонах виступів та платформах для спікерів, підсобних приміщеннях, судових приміщеннях, зонах перед розважальними атракціонами, ігровими зонами, зонами спортивної діяльності.

Результати дослідження. Більшість будівель в Україні не проєктувалося з урахуванням потреб людей з інвалідністю, що створює значні бар'єри для їх безпечної евакуації.

Вжиття заходів з інклюзії на діючих об'єктах в Україні здійснюється з порушенням вимог пожежної безпеки, що значно знизило пожежну безпеку людей на діючих об'єктах, особливо останніми роками.

Зокрема, це відбулося через впровадження на об'єктах похилих підйомників без розроблення проєктно-кошторисної документації, де були б враховані нормативні вимоги. Це створює додаткові ризики для людей під час евакуації та несе загрозу їх життю і здоров'ю.

Недосконалість законодавства не дає можливості чітко зрозуміти, коли допускається використання похилих підйомників. У будівельних нормах немає чіткого визначення, де саме і яким чином можна встановлювати такі підйомники.

Висновки. Проблема забезпечення інклюзивності шляхів евакуації є комплексною і вимагає системного підходу. Необхідне розроблення заходів, які дадуть змогу підвищити безпеку та комфорт для всіх категорій населення. Такими заходами можуть бути удосконалення нормативної бази через розроблення національних стандартів, які регламентуватимуть вимоги до пожежної безпеки під час використання похилих підйомників. Нормативи повинні чітко визначати умови, за яких дозволяється використання похилих підйомників, та встановлювати жорсткі вимоги до конструкції та встановлення. При цьому необхідно вивчити досвід інших країн та адаптувати кращі практики до українських реалій.

Слід підвищувати рівень обізнаності та проводити навчання для проєктувальників, будівельників, власників будівель та інших зацікавлених сторін щодо вимог доступності та безпеки. Треба проводити інформаційні кампанії для широкого кола громадськості задля підвищення обізнаності про права людей з інвалідністю та необхідність забезпечення їх безпеки.

Окремим аспектом є необхідність проведення регулярних перевірок дотримання норм доступності та пожежної безпеки на об'єктах з посиленням відповідальності власників та користувачів будівель за недотримання вимог.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Новина з вебсайту. В Україні налічується 3 мільйони людей з інвалідністю. *Укрінформ*. 2023. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-society/3763345-v-ukraini-nalichuetsya-3-miljoni-ludej-z-invalidnistu-zolnovic.html>
2. Закон України. Верховна Рада України. (1996, 28 червня). Конституція України: затверджена 28 червня 1996 року. Закон України № 254к/96-ВР.
3. Закон України Верховна Рада України. (1991, 21 березня). Про основи соціальної захищеності осіб з інвалідністю в Україні: Закон України № 875-XII.
4. ДСТУ Б ISO 21542:2013 Будинки і споруди. Доступність і зручність використання побудованого життєвого середовища (ISO 21542:2011, IDT) [чинний від 2014-04-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2014.
5. ДСТУ-Н Б В.2.2-31:2011 Будинки і споруди. Настанова з облаштування будинків і споруд цивільного призначення елементами доступності для осіб з вадами зору і слуху [чинний від 2012-10-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2011. 17 с.
6. Міжнародний договір Організація Об'єднаних Націй. (2006). Конвенція про права осіб з інвалідністю. Резолюція Генеральної Асамблеї ООН № 61/106.
7. Указ Президента України Зеленський, В.О. (2020, 20 серпня). Про забезпечення створення безбар'єрного простору в Україні: Указ Президента України № 358/2020.
8. Розпорядження Кабінету Міністрів України Кабінет Міністрів України. (2021, 14 квітня). Про схвалення Національної стратегії із створення безбар'єрного простору в Україні на період до 2030 року: Розпорядження Кабінету Міністрів України № 366-р.
9. Kumar, A., Khare, R., Sankat, S., Madhavi, P. (2022). Fire Evacuation of Elderly in High-Rise Residential Buildings in India. *Civil and Environmental Engineering*, 18. DOI: 10.2478/cee-2022-0024
10. McConnell, N. C., Boyce, K. E. (2015). Refuge areas and vertical evacuation of multistorey buildings: the end users' perspectives. *Fire Mater.*, 39, 396–406. DOI: 10.1002/fam.2205
11. Peleshko, M. Z., Bashynskyi, O. I., Berezhanskyi, T. H. (2022). Проблеми інклюзивності будівель та споруд в контексті безпечної евакуації. *Пожежна безпека*, 40, 71–77. DOI: 10.32447/20786662.40.2022.08
12. Ковалишин В. В., Доценко О. Г., Хлевной О. В., Дивель В. І. Дослідження евакуації людей різних груп мобільності з торговельно-розважального центру. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2022. № 2(14). С. 99–107. DOI: 10.33269/nvcs.2022.2(14).99-107
13. Хлевной О. В., Харишин Д. В., Назаровець О. Б. Проблеми питання розрахунку часу евакуації при пожежах у закладах дошкільної та серед-

ньої освіти з інклюзивними групами. *Пожежна безпека*. 2020. № 37. С. 72–76.

14. Kovalyshyn V. V., Khlevnoy O. V., Kharyshyn D. V. Primary school-aged children evacuation from secondary education institutions with inclusive classes. *Sciences of Europe*. Praha, 2020. Vol. 60. P. 53–56.

15. Ковалишин В. В., Хлевной О. В. Визначення площі горизонтальної проекції дітей шкільного віку. *Науковий вісник: цивільний захист і пожежна безпека*. 2020. № 2. С. 54–60.

16. Пономаренко А. В., Мацько В. А. Окремі аспекти формування безбар'єрного простору для маломобільних груп населення в умовах воєнного стану в Україні. *Збірник тез наукової доповіді Всеукраїнської науково-практичної конференції*. Київ, 19 квітня, 2024. С. 99–101.

17. Гордєєв П., Балло Я., Бедратюк О., Жихарев О. Проблеми питання інклюзивності будівель щодо забезпечення безпечної евакуації маломобільних груп населення. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020. С. 245–247.

18. Інклюзивність будівель і споруд. Основні положення. ДБН В.2.2-40:2018. Чинні від 2019-04-01. Київ: Мінрегіон України, 2018. 63 с.

19. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги: ДБН В.1.1-7:2016. Чинні від 2017-06-01. Київ: Мінрегіон України, Державне підприємство «Укрархбудінформ», 2017. 47 с.

20. НАПБ А.01.001-2014 Правила пожежної безпеки в Україні. URL: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/z0252-15>.

21. Вебсайт. URL: https://forstor.ua/ua/c-naklonnij-podjemnik-dlya-invalidov-7/?gad_source=1&gclid=CjwKCAjw0aS3BhA3EiwAKaD2ZcvAMKI9ntxSZMILBdnpr30oiP73CIJM9ntFOPiLowNmhzVRriHzGB0CN9gQAvD_BwE

22. Вебсайт. URL: <https://grandms.pro/objects>.

23. NZS 4121:2001. Design for Access and Mobility – Buildings and Associated Facilities [Effective from 1 April 2017].

24. 2010 ADA Standards for Accessible Design on September 15, 2010.

REFERENCES

1. Novyna z veb-saitu [News from the website] (2023). V Ukraïni nalichuetsya 3 milljoni lyudej z invalidnistyu [Ukraine has 3 million people with disabilities]. *Ukrinform*. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-society/3763345-v-ukraini-nalichuetsya-3-miljoni-ludej-z-invalidnistu-zolnovic.html> [in Ukrainian].
2. Zakon Ukrainy. Verkhovna Rada Ukrainy. (1996, 28 chervnia). Konstytutsiia Ukrainy: Zatverdzhena 28 chervnia 1996 roku. Zakon Ukrainy № 254k/96-VR [Law of Ukraine. Verkhovna Rada of Ukraine. (1996, 28 June). The Constitution of Ukraine: Approved

28 June 1996. Law of Ukraine No. 254к/96-BP] [in Ukrainian].

3. Zakon Ukrainy Verkhovna Rada Ukrainy. (1991, 21 bereznia). Pro osnovy sotsialnoi zakhyschenosti osib z invalidnistiu v Ukraini: Zakon Ukrainy № 875-KhII [Law of Ukraine Verkhovna Rada of Ukraine. (1991, 21 March). On the basis of social protection of persons with disabilities in Ukraine: Law of Ukraine No. 875-XII] [in Ukrainian].

4. DSTU B ISO 21542:2013 Budynky i sporudy. Dostupnist i zruchnist vykorystannia pobudovanoho zhyttievoho seredovyscha (ISO 21542:2011, IDT). [Chynnyi vid 2014-04-01]. Vyd. ofits. Kyiv : Minrehion Ukrainy, 2014 [in Ukrainian].

5. DSTU-N B V.2.2-31:2011 Budynky i sporudy. Nastanova z oblashtuvannia budynkiv i sporud tsyvilnogo pryznachennia elementamy dostupnosti dlia osib z vadamy zoru y slukhu. [Chynnyi vid 2012-10-01]. Vyd. ofits. Kyiv : Minrehion Ukrainy, 2011. 17 s. [in Ukrainian].

6. Mizhnarodnyi dohovor Orhanizatsiia Obiednanykh Natsii. (2006). Konventsiiia pro prava osib z invalidnistiu. Rezoliutsiia Heneralnoi Asamblei OON № 61/106 [United Nations International Treaty (2006). Convention on the Rights of Persons with Disabilities. UN General Assembly Resolution 61/106] [in Ukrainian].

7. Ukaz Prezydenta Ukrainy Zelenskyi, V. O. (2020, 20 serpnia). Pro zabezpechennia stvorennia bezbariernoho prostoru v Ukraini: Ukaz Prezydenta Ukrainy № 358/2020 [Decree of the President of Ukraine Zelensky, V.O. (2020, 20 August). On ensuring the creation of a barrier-free space in Ukraine: Decree of the President of Ukraine No. 358/2020] [in Ukrainian].

8. Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy Kabinet Ministriv Ukrainy. (2021, 14 kvitnia). Pro skhvalennia Natsionalnoi stratehii iz stvorennia bezbariernoho prostoru v Ukraini na period do 2030 roku: Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy № 366-r [Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine Cabinet of Ministers of Ukraine (2021, 14 April). On approval of the National Strategy for Creating a Barrier-Free Space in Ukraine until 2030: Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 366-p.] [in Ukrainian].

9. Kumar, A., Khare, R., Sankat, S., Madhavi, P. (2022). Fire Evacuation of Elderly in High-Rise Residential Buildings in India. *Civil and Environmental Engineering*, 18, DOI: 10.2478/cee-2022-0024 [in English].

10. McConnell, N. C., & Boyce, K. E. (2015). Refuge areas and vertical evacuation of multistorey buildings: the end users' perspectives. *Fire Mater.*, 39, 396–406. DOI 10.1002/fam.2205 [in English].

11. Peleshko, M. Z., Bashynskyi, O. I., Berezhanskyi, T. H. (2022). Problemy inkliuzyvnosti budivel ta sporud v konteksti bezpechnoi evakuatsii [Problems of inclusivity of buildings and structures in

the context of safe evacuation]. *Pozhezhna bezpeka* [Fire safety] 40, 71–77. DOI: 10.32447/20786662.40.2022.08 [in Ukrainian].

12. Kovalyshyn V. V., Dotsenko O. H., Khlevnoi O. V., Dyvel V. I. Doslidzhennia evakuatsii liudei riznykh hrup mobilnosti z torhivelno-rozvazhalnogo tsentru. Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka. 2022. № 2 (14). S. 99–107. DOI: 10.33269/nvcz.2022.2(14).99-107 [in Ukrainian].

13. Khlevnoi O. V., Kharyshyn D. V., Nazarovets O. B. Problemni pytannia rozrakhunku chasu evakuatsii pry pozhezhakh u zakladakh doshkilnoi ta serednoi osvity z inkliuzyvnymy hrupamy. *Pozhezhna bezpeka*. 2020. No. 37. S. 72–76 [in Ukrainian].

14. Kovalyshyn V. V., Khlevnoy O. V., Kharyshyn D. V. Primary school-aged children evacuation from secondary education institutions with inclusive classes. *Sciences of Europe*. Praha, 2020. Vol. 60. S. 53–56 [in Ukrainian].

15. Kovalyshyn V. V., Khlevnoi O. V. Vyznachennia ploshchi horyzontalnoi proektsii ditei shkilnogo viku. Naukovyi visnyk: tsyvilnyi zakhyst i pozhezhna bezpeka. 2020. No. 2. S. 54–60 [in Ukrainian].

16. Ponomarenko, A. V., Mats'ko, V. A., Ponomarenko A. V., Matsko V. A. Okremi aspekty formuvannia bezbariernoho prostoru dlia malomobilnykh hrup naselennia v umovakh voiennoho stanu v Ukraini, s. 99–101 [Some aspects of forming a barrier-free environment for people with reduced mobility in wartime conditions, p. 99–101]. Zbirnyk tez naukovoi dopovidi Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii [collection of abstracts of the scientific report of the All-Ukrainian scientific and practical conference]. Kyiv, 19 kvitnia. 2024 r. 415 s [in Ukrainian].

17. Gordiev, P., Ballo, Ya., Bedratyuk, O., Zhykhare O. Problemni pytannia inkliuzyvnosti budivel shchodo zabezpechennia bezpechnoi evakuatsii malomobilnykh grup naselennia [Problems of inclusivity of buildings regarding the safe evacuation of people with reduced mobility]. In *Materialy XI Mizhnarodnoj naukovo-praktychnoj konferentsij Teoriia i praktyka gasinnia pozhezh ta likvidatsij nadzvychainykh sytuatsii: Materialy XI Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii – Cherkasy*. [Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference Theory and Practice of Fire Fighting and Emergency Response: Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference] ChIPB im. Heroiv Chornobylia NUTsZ Ukrainy, 2020. 314 s. [in Ukrainian].

18. Inkliuzyvnist budivel i sporud. Osnovni polozhennia. DBN V.2.2-40:2018 Chynni vid 2019-04-01 – K. Minrehion Ukrainy, 2018. 63 s. [in Ukrainian].

19. Pozhezhna bezpeka obektiv budivnytstva. Zahalni vymohy: DBN V.1.1-7:2016 – Chynni vid 2017-06-01. – K. : Minrehion Ukrainy, Derzhavne

pidpriemstvo “Ukrarkhbudinform”, 2017. 47 s. [in Ukrainian].

20. NAPB A.01.001-2014 Pravyla pozhezhnoi bezpeky v Ukraini. URL: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/z0252-15> [in Ukrainian].

21. Vebsait. URL: [https://forstor.ua/ua/c-naklonnij-podjemnik-dlya-invalidov-7/?gad_source=1&gclid=CjwKCAjw0aS3BhA3EiwAKaD2ZcvAMKI9ntxSZMIL](https://forstor.ua/ua/c-naklonnij-podjemnik-dlya-invalidov-7/?gad_source=1&gclid=CjwKCAjw0aS3BhA3EiwAKaD2ZcvAMKI9ntxSZMILBdnpr30oiP73CIJM9ntFOplLowNmhzVRriHzGBoC)

Bdnpr30oiP73CIJM9ntFOplLowNmhzVRriHzGBoC
N9gQAvD_BwE

22. Vebsait. URL: <https://grandms.pro/objects>.

23. NZS 4121:2001. Design for Access and Mobility – Buildings and Associated Facilities [Effective from 1 April 2017] [in English].

24. 2010 ADA Standards for Accessible Design on September 15, 2010 [in English].

© В. С. Мирошкін, М. З. Пелешко, Вол. В. Ковалишин, І. С. Грідасов

Оглядова стаття

Надійшла до редакції 25.04.2025

Прийнято до публікації 04.06.2025



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.46.2025.10>

*В.-П. О. Пархоменко, Б. М. Михалічко, О. І. Лавренюк, Р. В. Пархоменко,
І. П. Кравець*

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7431-4801> – В.-П. О. Пархоменко

<https://orcid.org/0000-0002-5583-9992> – Б. М. Михалічко

<https://orcid.org/0000-0003-4509-2896> – О. І. Лавренюк

<https://orcid.org/0000-0002-3146-7952> – І. П. Кравець

✉ vp2018@gmail.com

ІННОВАЦІЙНІ РОЗРОБКИ ТА СУЧАСНІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВОДНИХ ВОГНЕГАСНИХ РОЗЧИНІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ІНГІБІТОРІВ

Проблема. Сучасний технологічний прогрес супроводжується появою нових матеріалів з підвищеною пожежною небезпекою, як-от літій-іонні батареї, біопаливо та вибухонебезпечні суміші, що ускладнює їх гасіння традиційними водними засобами через низьку в'язкість, слабку змочуваність і швидке випаровування води, створюючи труднощі для оперативно-рятувальних служб у боротьбі з пожежами класів А, В, С, D, F.

Мета. Метою роботи є аналіз сучасного стану використання водних вогнегасних розчинів (ВВР) з інгібіторами, висвітлення методів підвищення їхньої ефективності та оцінювання перспектив застосування для гасіння сучасних пожеж, а також розроблення рекомендацій для вдосконалення вогнегасних речовин.

Методи дослідження. Дослідження проведено аналітичним методом з обробкою наукових публікацій, експериментальних даних і патентної документації щодо ефективності ВВР з інгібіторами, включно з порівняльним аналізом їхніх фізичних і хімічних властивостей.

Основні результати дослідження. На підставі проведеного огляду наукових праць встановлено, що додавання інгібіторів, як-от хлорид калію (KCl, 3–5 %), полігексаметиленгуанідин (ПГМГ, 5 %), хлорид натрію (NaCl, 5–10 %), фосфати амонію (5–10 %), бікарбонати (5–35 %) та наночастинки (SiO₂, Al₂O₃, 2–5 %), підвищує ефективність ВВР: час гасіння скорочується на 20–60 %, витрата речовини зменшується на 10–40 %, а повторне займання запобігається протягом 5–24 годин завдяки охолодженню, ізоляції кисню та хімічному пригніченню горіння; інноваційним підходом є розроблення нових складів (наприклад, «суха вода» з бікарбонатами, ВВР з наночастинками) та технологій їх приготування (ультразвук, змішування).

Висновки. ВВР з інгібіторами є перспективним рішенням для гасіння сучасних пожеж, забезпечуючи екологічність, економічність і адаптивність, однак потребують подальших досліджень для оптимізації складів і технологій впровадження для гасіння пожеж різних класів.

Ключові слова: водні вогнегасні речовини, інгібітори, гасіння пожеж, ізоляція кисню, хімічне пригнічення.

INNOVATIVE DEVELOPMENTS AND MODERN METHODS FOR ENHANCING THE EFFICIENCY OF WATER-BASED FIRE EXTINGUISHING SOLUTIONS USING INHIBITORS

Problem. The advancement of modern technology has led to the emergence of new materials with heightened fire hazards, such as lithium-ion batteries, biofuels, and explosive mixtures, which pose challenges for extinguishment using traditional water-based agents due to water's low viscosity, poor wettability, and rapid evaporation, complicating firefighting efforts for classes A, B, C, D, and F by emergency response services.

Purpose. The purpose of the study is to analyze the current state of water-based fire extinguishing agents (WFEA) with inhibitors, elucidate methods to enhance their efficiency, evaluate their potential for suppressing modern fires, and provide recommendations for improving fire suppressants.

Research methods. The study employs an analytical method involving the processing of scientific publications, experimental data, and patent documentation on the effectiveness of WFEA with inhibitors, including a comparative analysis of their physical and chemical properties.

Research results. Based on the review of scientific papers, it was found that the addition of inhibitors such as potassium chloride (KCl, 3–5 %), oligohexamethylene guanidine (OMMG, 5 %), sodium chloride (NaCl, 5–10 %), ammonium phosphates (5–10 %), bicarbonates (5–35 %) and nanoparticles (SiO_2 , Al_2O_3 , 2–5 %) increases the efficiency of the ERS: extinguishing time is reduced by 20–60 %, substance consumption is reduced by 10–40 %, and re-ignition is prevented within 5–24 hours due to cooling, oxygen isolation and chemical combustion suppression; an innovative approach is the development of new formulations (e.g., “dry water” with bicarbonates, WWA with nanoparticles) and technologies for their preparation (ultrasound, mixing).

Conclusions. WFEA with inhibitors is a promising solution for extinguishing modern fires, providing environmental friendliness, economy and adaptability, but further research is needed to optimize the compositions and implementation technologies for extinguishing fires of different classes.

Key words: water-based fire extinguishing agents, inhibitors, fire suppression, oxygen isolation, chemical suppression.

Вступ. Технологічний прогрес людства супроводжується розробленням нових технологій, які будуть корисні суспільству щодо практичного використання та у фінансовому аспекті. Це супроводжується модифікацією наявних та створенням нових матеріалів, що мають певний рівень пожежної безпеки. Це створює низку проблем для особового складу пожежно-рятувальних підрозділів через те, що потрібно змінювати підходи до навчання особового складу та дій під час ліквідації пожеж. Також необхідно удосконалити параметри наявних вогнегасних речовин.

Найбільш поширеними вогнегасними речовинами, що використовують працівники оперативно-рятувальної служби цивільного захисту, є вода, водні розчини піноутворювачів та вогнегасні порошки. Кожна речовина має свої фізичні властивості, що ефективно використовується для гасіння пожеж різних класів. Найбільше використання мають вода та водні розчини піноутворювачів та солей. Завдяки введенню до складу води певних хімічних речовин можна суттєво підвищити вогнегасні властивості води, зменшити випаровування та підвищити ефективність тепловідведення [1–4].

Незважаючи на значний прогрес у створенні водних вогнегасних розчинів, питання пошуку нових водних вогнегасних речовин (ВВР) залишається актуальним. Це зумовлено насамперед появою нових речовин та матеріалів, які характеризуються підвищеними температурами займання та самозаймання за умов дії на них полум'я, а також характеристиками різних класів пожеж.

Таким чином, необхідність пошуку нових ВВР та підвищення їхньої ефективності є актуальною науковою та практичною проблемою. Розроблення нових ВВР дасть змогу збільшити ефективність придушення полум'я, знизити витрати на ліквідацію пожеж та мінімізувати екологічні ризики, пов'язані з використанням вогнегасних засобів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження свідчать про значну перспективність використання ВВР з інгібіторами для гасіння пожеж завдяки їхній здатності поєднувати охолодження, ізоляцію кисню та хімічне пригнічення горіння. Для підвищення ефективності цих ВВР додатково у їхній склад можуть додавати в оптимальних концентраціях поверхнево-активні речовини, згущувачі, антифризи та інші компоненти, які завдяки своїм хімічним і фізичним

параметрам будуть в комплексі з інгібітором та водою ефективно ліквідувати займання матеріалів та унеможлилювати частково чи повністю їх повторне займання. Однією з інноваційних розробок є використання гелеутворювальних систем для гасіння горючих рідин [5], що підкреслюють їхню адаптивність до складних умов горіння. Серед інгібіторів, який найчастіше використовується на практиці пожежогасіння, слід назвати хлорид калію (KCl) у поєднанні зі стабілізаторами.

Також одним з поширених інгібіторів для ВВР є полігексаметиленгуанідин (ПГМГ) [6] через свою стабільність складу і екологічність під час гасіння пожеж класу А. Широкого використання набули фосфати $((\text{NH}_4)_3\text{PO}_4)$ та сульфати амонію $((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4)$, що під час гасіння ВВР переривають ланцюгові реакції горіння, нейтралізуючи вільні радикали та виділяючи негорючі гази (N_2 , CO_2), а в комплексі з борною (H_3BO_3) та бурою кислотами ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) підсилюють інгібування, утворюючи захисний шар на поверхні, який перешкоджає доступу кисню та унеможливорює повторне займання горючих матеріалів [7].

Ще одним перспективним напрямом використання ВВР з інгібіторами є гасіння займань дизельного біопалива та його сумішей з нафтовим дизельним паливом. У цьому напрямі перспективним себе проявив хлорид натрію (NaCl), яких впливає на пригнічення хімічних реакцій горіння шляхом розбавлення кисню в зоні полум'я та часткового утворення захисного шару на поверхні палива [8].

Представлені результати є ефективними, а ВВР потребують подальшого дослідження. Доцільно провести аналіз сучасних розробок та методів підвищення ефективності ВВР з інгібіторами для гасіння пожеж класів А, В, С, D та F. Подальші дослідження мають зосередитися на оптимізації концентрацій та адаптації цих розчинів до реальних умов пожежогасіння.

Метою роботи є висвітлення сучасного стану використання у пожежогасінні водних вогнегасних розчинів з інгібіторами та способів підвищення їхньої ефективності.

Методи дослідження. Аналітичний метод досліджень, що супроводжується обробкою інформації щодо ефективності використання в пожежогасінні водних вогнегасних розчинів з інгібіторами.

Результати дослідження. Недолік води як вогнегасного засобу пояснюється її фізико-хімічними властивостями, насамперед низькою в'язкістю, яка характеризується здатністю чинити опір перетіканню, мінімізувати свою площу поверхні, що забезпечується великим значенням поверхневого

натягу, а також відзначається невеликою змочуваністю твердих поверхонь, що зумовлено малою адгезією «прилипанню» води до горючих поверхонь і, як наслідок, розтікання на них [9–14]. Послаблення цих ефектів можна досягти через введення невеликих кількостей додаткових речовин, що підвищують ефективність ВВР.

До основних шляхів придушення процесу горіння належать способи перешкоджання надходженню кисню (окисник) до осередку горіння, зниження концентрації кисню в повітрі шляхом розведення його негорючими газоподібними речовинами, зниження температури горіння до рівня, нижчого за температуру спалаху, зменшення концентрації горючих речовин шляхом розведення їх негорючими речовинами, інтенсивне зниження швидкості хімічної реакції (інгібування), механічний зрив полум'я потужним струменем води, порошку, газу.

Реалізація цих рішень з використанням вогнегасних речовин, що подаються з технічних засобів пожежогасіння, забезпечує можливість припинення процесу горіння. Вибір тих чи інших способів гасіння пожеж, а також вогнегасних речовин, способів і засобів їх доставки в осередок горіння визначають у кожному конкретному випадку залежно від масштабу пожежі, особливостей горючих речовин і матеріалів, а також стадії розвитку пожежі [15].

Для нашого дослідження практичного інтересу набуває проведення аналізу сучасних способів та розкриття інноваційних методів підвищення ефективності ВВР за допомогою додавання до них інгібіторів для пожеж різного характеру, а також висвітлення їхньої ефективності гасити пожежі різних класів.

Так, у роботі [16] автори досліджують гасіння вибухів вугільного пилу за допомогою композитного пригнічувача горіння на основі гідрокарбонату натрію (NaHCO_3). Цей ВВР отримують шляхом розчинення у воді NaHCO_3 до концентрації 5–10 % за 25 °C з перемішуванням. Під час нагрівання NaHCO_3 розкладається ($2\text{NaHCO}_3 = \text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} + 2\text{CO}_2$), виділяючи CO_2 і водяну пару, які знижують концентрацію кисню в зоні горіння та охолоджують її. Інгібуюча дія іонів Na^+ зводиться до захоплення хімічних радикалів (H і OH) в полум'ї, перериваючи ланцюгові реакції вибуху. Результати досліджень свідчать про те, що максимальний тиск вибуху вугільного пилу знижується на 30–35 % під час додавання гідрокарбонату натрію. Швидкість поширення полум'я зменшується на 35–45 % (з 250 м/с до 140–160 м/с) завдяки інгібуванню. Час гасіння вибуху скорочується на 30–40 %, створюються умови для

запобігання повторному займанню завдяки ізоляції та хімічному ефекту.

Також тематиці розроблення та підвищення ефективності ВВР присвячено дисертаційне дослідження [17], де розглядається можливість використання ВВР з додаванням інгібіторів для підвищення ефективності гасіння низових лісових пожеж. Основна увага зосереджена на оптимізації складу ВВР з додаванням хлориду калію (KCl) як інгібітора і гліцерину як стабілізатора, щоб скоротити час гасіння, зменшити витрату речовини та запобігти повторному займанню. Розчин заливають у ручні ранцеві вогнегасники або розпилювачі з тиском 0,2–0,3 МПа, що створює дрібнодисперсний струмінь (краплі 100–200 мкм), при цьому хлорид калію в оптимальній концентрації 3–5 % під час нагрівання його водного розчину дисоціює, виділяючи іони K^+ , які нейтралізують вільні радикали $H \cdot$ і $OH \cdot$ у газовій фазі полум'я, перериваючи ланцюгові реакції горіння, вода поглинає тепло, знижуючи температуру осередку горіння нижче точки займання, а гліцерин підвищує в'язкість розчину, утворюючи тонку плівку на поверхні рослин. Це частково блокує доступ кисню до тліючих осередків. Експериментальні дослідження проводились на модельних осередках із сухої трави, хвої та деревини сосни, а результати порівнювалися з використанням чистої води.

Автори робіт [18; 19] запропонували ефективний ВВР інгібітора для гасіння пожеж і запобігання повторному загорянню модулів літій-залізофосфатних ($LiFePO_4$) акумуляторів. В цьому разі ВВР отримали шляхом розчинення інгібітора (Na_3PO_4 або $NaHCO_3$) як хімічної добавки у воді до концентрації 5–10 % за температури 20–25 °C з перемішуванням до однорідної маси. Інгібітор сповільнює розігрівання, нейтралізуючи радикали та зменшуючи виділення горючих газів (H_2 , CO). Водна основа забезпечує охолодження, а інгібітор утворює захисний шар, що ізолює електроліт від кисню.

Ефективність отриманих результатів полягає у скороченні часу гасіння полум'я на 30–40 % порівняно з чистою водою, швидшому зниженні температури осередку горіння на 25–35 % (з 600–800 °C до 400–500 °C за 10–12 секунд) завдяки охолодженню та сповільненню розігрівання, а також зменшенню витрати вогнегасної речовини на 20–30 %.

Ще однією ефективною розробкою для гасіння загорянь літій-іонних елементів живлення (ЛПЕЖ) є запропоновані авторами роботи [20; 21] ВВР, що містять інгібітор і поверхнево-активну речовину (ПАР). Для отримання ВВР до води додають 10 % хлориду натрію та 0,5 % неіоногенної ПАР. Для

гасіння загорянь ЛПЕЖ цей розчин подають через форсунку під тиском 0,8 МПа для отримання дрібнодисперсного водяного туману, що дає змогу ефективно збивати факел полум'я. Тому внаслідок проведення експериментальних досліджень автори стверджують, що запропонований ВВР скорочує час факельного горіння ЛПЕЖ на 40–50 % порівняно з дрібнодисперсним водним струменем без добавок, знижує температуру поверхні елементу живлення на 50–60 %, зменшує швидкість тепловиділення на 35–45 %, що свідчить про ефективне пригнічення реакцій горіння.

Дієвий ВВР з використанням наночастинок оксиду алюмінію (Al_2O_3) як інгібітора полум'я для гасіння пожеж, зокрема газових сумішей, представлений у статті [22]. Наночастинок Al_2O_3 діють як теплові поглиначі, абсорбуючи тепло та знижуючи температуру зони горіння. Завдяки великій площі поверхні вони створюють фізичний бар'єр, ускладнюючи доступ кисню. Можуть каталізувати утворення негорючих газів або осідати на поверхні, перериваючи ланцюгові реакції горіння. Під час додавання 5 % наночастинок оксиду алюмінію час гасіння полум'я метану скорочується на 25–35 %, температура зони горіння знижується швидше на 20–30 % (з 1500–1700 °C до 1000–1200 °C за 5–7 секунд) завдяки поглинанню тепла наночастинками та їхній інгібуючій дії. Швидкість поширення полум'я зменшується на 15–25 %. Витрата вогнегасної речовини зменшується на 10–20 % через ефективніше пригнічення горіння. Повторне займання запобігається протягом 5–10 хвилин.

Ефективність ВВР під час гасіння пожеж різних класів (класи А, В, F) з додаванням модифікованих агентів із застосуванням нанотехнологій, зокрема вогнегасних наночастинок, досліджувалась у роботі [23]. Як інгібітори використовували SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 в оптимальному співвідношенні 2–5 %, диспергованих у воді за допомогою ультразвукової обробки протягом 20–60 хвилин для забезпечення однорідності. Дисперговані оксиди металів або карбонові нанотрубки мають більшу площу поверхні з активними центрами, що сприяє кращому поглинанню тепла та перериванню ланцюгових реакцій горіння, підвищуючи ефективність охолодження та пригнічення полум'я.

Ефективність отриманих результатів полягає у скороченні часу гасіння горіння на 20–40 %, зниженні температури в зоні горіння на 15–30 % завдяки високій теплоємності та теплопровідності, зменшенні витрати вогнегасної речовини на 10–25 %.

В роботах [24; 25] описаний ВВР, який використовують в авіаційних вогнегасних боєприпасх

для гасіння низових і верхових лісових пожеж. Як інгібітор у цьому ВВР використовують $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ як хімічну добавку до води, у співвідношенні 5–10 %. Готовий ВВР заливають у боєприпас, який після детонації розприскується у вигляді туману.

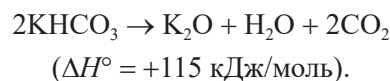
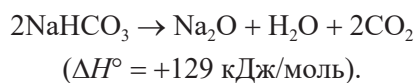
Цей водний розчин може скидатися пожежними літаками та гелікоптерами на лісові пожежі. Після вибуху такого боєприпасу ВВР розбризкується, формуючи туман, який охолоджує палаючу поверхню та блокує доступ кисню в зону горіння. Висока дисперсія за розміру крапель 50–100 мкм забезпечує проникнення ВВР в густі лісові масиви. Ефективність цього ВВР проявляється у скороченні часу гасіння лісових пожеж на 50–60 % з 20–30 до 8–12 хвилин (експеримент проводили в польових умовах на площі 10 м²), швидшому зниженні температури зони горіння на 40–50 % та зменшенні витрати вогнегасної речовини на 30–40 %. Після завершення гасіння лісових пожеж повторного загоряння не спостерігалось протягом 10 хвилин, що свідчить про ефективну ліквідацію залишкових осередків горіння.

Перспективність використання амоній фосфатів як ефективних інгібіторів ВВР для боротьби з лісовими пожежами (клас А) згадується у статті [26]. В цьому огляді як інгібітори використовують водні розчини амоній гідрофосфату ($(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$) і амоній дигідрофосфату ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) у співвідношенні 8–12 %, які завантажують у авіаційний транспорт пожежно-рятувальних служб, де він зберігає стабільність під час транспортування та розприскування. Амоній фосфати спроможні ефективно переривати ланцюгові реакції горіння, нейтралізуючи вільні радикали полум'я. Водна ж основа ВВР охолоджує поверхню, а додані до неї згущувачі у кількості 1–2 % утворюють бар'єр, що уповільнює поширення вогню та ізолює зону горіння від кисню.

Однією з новітніх розробок для гасіння пожеж класів А, В, D та електроустановок є винахід [27–29], де ВВР, що містить інгібітор у комбінації з газами, інгібітор ($\text{CF}_3\text{CH}_2\text{CHF}_2$), за оптимальної концентрації 10–15 %, перериває ланцюгові реакції горіння, нейтралізуючи вільні радикали Н і ОН а газ N_2 або Ar у концентрації 5–10 %, подається під тиском 2–5 атм, сприяє підвищенню дисперсності ВВР та підвищує його проникнення в осередок горіння. Клас токсичності цього ВВР становить III – помірно небезпечні, час гасіння скорочується на 40–60 %, витрата ВВР знижується на 25 % порівняно з аналогами.

Ефективний вогнегасний засіб запропонували автори роботи [30], де інгібіторами виступають гідрокарбонати (NaHCO_3 та KHCO_3) в кількості 25–35 % для гасіння пожеж класів А і В. Втім, ВВР

використовували у порошкоподібній формі («суха вода»), де вода інкапсулюється в гідрофобний кремнезем (SiO_2). Під час нагрівання «суха вода» розпадається, вивільняючи воду для охолодження осередку горіння і CO_2 для розбавлення окисника:



Кремнезем (SiO_2) діє як фізичний бар'єр, ізолюючи горючу речовину від кисню повітря. При цьому вода (у кількості 55–65 %) випаровується, поглинаючи тепло, а CO_2 діє як флегматизатор.

Ці ВВР отримуються шляхом змішування води з NaHCO_3 або KHCO_3 і гідрофобним SiO_2 (в кількості 5–10 %) у високошвидкісному змішувачі (10,000 об/хв) протягом 30–60 секунд. Отриманий порошок зберігає текучість і розпилюється через стандартні системи подачі порошку. ВВР з KHCO_3 мають на 10–15 % вищу ефективність, ніж ВВР із NaHCO_3 .

Серед перспективних напрямів використання ВВР з інгібіторними добавками слід назвати гасіння пожеж за участю поліуретанової піни. Робота [31] присвячена оцінці ефективності гасіння пожеж класу А дрібнодисперсним струменем водного розчину інгібітора із застосуванням сопел типу Вентурі. Експериментальні дослідження проводились на платформі з поліуретановими ізоляційними плитами розміром 40 × 40 × 5 см, де тестувалися такі добавки, як NaCl , $\text{CH}_3\text{SO}_4\text{Na}$, KHCO_3 , $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, а також їхня комбінація за оптимальної їх концентрації у ВВР 1 % (тобто по 0,25 % кожного компонента). Для оцінювання вогнегасних властивостей добавок у ВВР використовували методи термічного аналізу і вимірювали поверхневий натяг. Результати порівнювалися з чистою водою, щоб визначити найкращий склад для швидкого гасіння горіння поліуретанової піни та зменшення температури зони горіння.

Дрібнодисперсна вода з композитною добавкою (1 % $\text{NaCl} + \text{CH}_3\text{SO}_4\text{Na} + \text{KHCO}_3 + \text{CO}(\text{NH}_2)_2$) значно підвищує ефективність гасіння пожеж з участю поліуретанових піл, скорочуючи час гасіння (на 30–40 %), зменшуючи витрату ВВР на гасіння (на 25–30 %) і пришвидшуючи зниження температури горіння (на 25–30 %) порівняно з водою. Синергічний ефект охолоджувальної, інгібувальної та ізоляційної дії робить цей склад оптимальним для гасіння пожеж класу А. Ця розробка є екологічною та проявляє більшу вогнегасну ефективність в охолодженому вигляді, втім,

потребує проведення вогневих випробувань на більших осередках горіння.

Висновки. Використання водних вогнегасних розчинів (ВВР) з добавками інгібіторів є перспективним напрямом у підвищенні ефективності гасіння пожеж різних класів завдяки поєднанню охолоджувальної, ізоляційної та інгібувальної дії. Застосування таких інгібіторів, як солі, полімери чи наночастинки, дає змогу скоротити час гасіння пожеж на 20–60 % і зменшити витрату ВВР на гасіння вогню на 10–40 %, що забезпечує економічність і практичність. Низка ВВР демонструє здатність запобігати повторному загорянню протягом 5–24 годин. Ефективність таких розчинів особливо помітна під час гасіння сучасних матеріалів з високими температурами горіння, що робить їх актуальними для оперативно-рятувальних служб. Низька токсичність і адаптивність до різних умов гасіння пожеж підкреслюють екологічну та технічну перевагу цих розробок. Подальший розвиток технологій приготування та оптимізація складу ВВР сприятимуть їх ширшому впровадженню у практику пожежогасіння.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Карвацька М., Пастухов П., Петровський В., Лавренюк О., Михалічко Б. Вогнегасні випробування концентрованого водного розчину ферум(III) сульфату. *Пожежна безпека*. 2022. № 40. С. 55–60. DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.40.2022.06>
2. Mykhalichko B., Lavrenyuk H., Mykhalichko O. New water-based fire extinguishant: Elaboration, bench-scale tests, and flame extinguishment efficiency determination by cupric chloride aqueous solutions. *Fire Safety Journal*. 2019. № 105. P. 188–195. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.03.005>
3. Карвацька М., Лавренюк О., Михалічко Б. Сучасний стан і напрями вдосконалення водних вогнегасних речовин. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2023. № 1(15) С. 92–100. DOI: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1\(15\).92-100](https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1(15).92-100)
4. Kodrik A., Titenko O., Zhartovskyi S., Borisov A., Shvydenko A. Theoretical Prerequisites for Creating a Fire-Extinguishing Solution Based on Water-Absorbing Polymer Ecoflocf-07 for Extinguishing Fires in Ecosystems. *Key Engineering Materials*. 2022. Vol. 927. P. 87–104. DOI: <https://doi.org/10.4028/p-647flv>
5. Дадашов Ільгар Фірдосі огли Розвиток наукових основ гасіння горючих рідин твердими пористими матеріалами та гелеутворюючими системами: дис. ... докт. техн. наук: спец. 21.06.02. Харків, 2019. 391 с.
6. Магльована Т. Фізико-хімічні властивості водних вогнегасних речовин на основі полігексаметиленгуанідину. *Пожежна безпека: теорія і практика*. 2014. № 17. С. 67–72.
7. Vuozzo M. Fire inhibitor formulation. Patent US9920250B. USA, 2018.
8. Скоробагатько Т., Антонов А., Боровиков В. Особливості процесів горіння дизельного біопалива, його сумішей з нафтовим дизельним паливом та процесів взаємодії вогнегасних речовин з полум'ям під час їх гасіння. *Інтернаука: міжнародний науковий журнал. Розділ: Технічні науки*. 2019. № 11(73). С. 52–63. DOI: [10.25313/2520-2057-2019-11-5112](https://doi.org/10.25313/2520-2057-2019-11-5112)
9. Кодрик А., Коваленко В., Тітенко О., Борисов А., Стилик І., Борисова, А. Шляхи підвищення ефективності водних вогнегасних речовин на основі рідкого скла. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2022. № 1(13). С. 24–34. DOI: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.1\(13\).24-34](https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.1(13).24-34)
10. Anatolii Kodrik, Oleksandr Titenko, Sergiy Zhartovskyi, Andriy Borisov, Andriy Shvydenko Theoretical Prerequisites for Creating a Fire-Extinguishing Solution Based on Water-Absorbing Polymer Ecoflocf-07 for Extinguishing Fires in Ecosystems. *Key Engineering Materials*. 2022. Vol. 927. P. 87–104. DOI: <https://doi.org/10.4028/p-647flv>
11. Fanbao Chen, Bin Yao, Wanhai Guo, Guoqing Zhu, Tingting Xu, Tao Deng, Zhenhua Jiang, Ziyang Wang, Min Peng, Xinyu Wang Experiment study on fire extinguishing effects of airflow-water synergistic jet. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2023. Vol. 49. 103367. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103367>
12. Yang Liu, Zhixi Fu, Guanghui Zheng, Peng Chen Study on the effect of mist flux on water mist fire extinguishing. *Fire Safety Journal*. 2022. Vol. 130. 103601. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2022.103601>
13. Hüsniğül Yılmaz-Atay, Jacek Lukasz, Wilk-Jakubowski A Review of Environmentally Friendly Approaches in Fire Extinguishing: From Chemical Sciences to Innovations in Electrical Engineering. *Polymers*. 2022. № 14(6). 1224. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14061224>
14. Fanbao Chen, Bin Yao, Guoqing Zhu, Wanhai Guo, Tingting Xu, Tao Deng, Zhenhua Jiang, Ziyang Wang, Min Peng, Xinyu Wang Improving the fire-extinguishing effect of pneumatic extinguishers with airflow-spray synergistic jet: Investigation of nozzle position and number of nozzles. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2023. Vol. 47. 103124. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103124>
15. Коротинський П. та ін. Довідник керівника гасіння пожежі. Київ: ЛітераДрук, 2016. 320 с.
16. Zhai, X. W., Pan, W. J., Xiao, Y. Wang S., Ouyang L. Inhibition of coal spontaneous combustion by an environment-friendly, water-based fire extinguishing agent. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2021. Vol. 144. P. 325–334. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-020-10101-6>
17. Савельєв Д. Підвищення ефективності гасіння низових лісових пожеж шляхом використання бінарних вогнегасних систем з роздільним

подаванням: дис. ... канд. техн. наук: 21.06.02. Харків, 2020. 170 с.

18. Zhang, M. Jialiang Liu, Yilin Lai, Hao Liu, Hao Chen, Maosong Fan, Mengmeng Geng. Fire Extinguishing Effect of Reignition Inhibitor on Lithium Iron Phosphate Storage Battery Module. *The proceedings of the 10th Frontier Academic Forum of Electrical Engineering (FAFEE2022)*. FAFEE 2022. Lecture Notes in Electrical Engineering. Springer, Singapore, 2023. Vol 1054. P. 703–711. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-3408-9_60

19. Zhang, L., Jin, K., Sun, J. Wang, Q. A Review of Fire-Extinguishing Agents and Fire Suppression Strategies for Lithium-Ion Batteries Fire. *Fire Technology*. 2024. Vol. 60. P. 817–858. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10694-022-01278-3>

20. Zhou, Y., Wang, Z., Gao, H., Wan X., Qiu H., Zhang J., Di J. Inhibitory effect of water mist containing composite additives on thermally induced jet fire in lithium-ion batteries. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2022. Vol. 147. P. 2171–2185. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10673-x>

21. Wang, H., Zhang, Y., Zhang, G. et al. Study on the Fire Suppression Efficiency of Common Extinguishing Agents for Lithium Iron Phosphate Battery Fires. *Fire Technology*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10694-024-01687-6>

22. Mohammad Hamdan, Suleiman Enjadat, Ahmad Sakhrich Flame inhibition using nanotechnology. *International Journal of Thermofluids*. 2024. Vol. 21. 100583. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100583>

23. Anna Rabajczyk, Maria Zielecka, Justyna Gniazdowska Application of Nanotechnology in Extinguishing Agents. *Materials (Basel)*. 2022. Vol. 15(24). 8876. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15248876>

24. Li Haoyang, Zhiming Du Study on the development of aerial fire extinguishing munition for forest fires and fire extinguishing tests. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2024. Vol. 55. 104138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104138>

25. Haoyang Li, Jinyuan Hao, Zhiming Du Study on the Minimum Fire-Extinguishing Concentration of Several Commonly Used Extinguishing Agents to Suppress Pyrolysis Gas of Red Pine Wood. *ACS Omega*. 2023. Vol. 8(8). P. 7757–7766. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c07424>

26. Edward Goldberg. Industry Standard: Understanding the Science of Chemical Retardants. *International Association of Wildland Fire*. 2022. URL: <https://www.iawfonline.org/article/industry-standard-understanding-the-science-of-chemical-retardants>

27. Stephen Conboy Methods of suppressing wild fires raging across regions of land in the direction of prevailing winds by forming anti-fire (AF) chemical fire-breaking systems using environmentally clean anti-fire (AF) liquid spray applied using GPS-tracking techniques. Patent US10653904B2. USA, 2021.

28. Xiyu Wang, Yuanbo Xue, Yongliang Tian, Hu Liu, Zhiyong Cai Planning and Evaluation of Water-Dropping Strategy for Fixed-Wing Fire Extinguisher Based on Multi-Resolution Modeling. *Aerospace*. 2024. Vol. 11. P. 929. DOI: <https://doi.org/10.3390/aerospace11110929>

29. D. Dubinin, A. Lisniak, K. Ostapov, S. Shevchenko, Y. Kirvoruchko, I. Hrytsyna, Y. Senchykhin Studying fire extinguishers with the combined supply of the foam-water extinguishing agents in an aerosol state. *SIGURNOST*. 2024. Vol. 66(4). P. 319–332. DOI: <https://doi.org/10.31306/s.66.4.2>

30. Xiang Wang, Jun-Cheng Jiang, Yong-Qi Wang, Sheng-Li Chu, Fei-Hao Zhu, An-Chi Huang Efficacy evaluation of bicarbonate formulations dry water fire extinguishing agents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2024. Vol. 92. 105444. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2024.105444>

31. Du, C. Y., Yang, Y., Zhai, J., Zhai J., Yang X.-Z., Tang Y., Dong X.-L. Effectiveness evaluation of fine water mist venturi nozzle systems with composite additives in improving fire suppression in polyurethane fires. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2024. Vol. 149. P. 13495–13510. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13666-8>

REFERENCES

1. Karvatska, M., Pastukhov, P. & Mykhalichko B. (2022). Vohnehasni vyprobuвання kontsentrovanoho vodnoho rozchynu ferum(III) sulfatu [Fire-fighting tests of concentrated aqueous solution of ferric sulfate]. *Pozhezhna bezpeka: zb. nauk. prats*, 40, 55–60. doi: <https://doi.org/10.32447/20786662.40.2022.06>

2. Mykhalichko B., Lavrenyuk H., Mykhalichko O. (2019). New water-based fire extinguishant: Elaboration, bench-scale tests, and flame extinguishment efficiency determination by cupric chloride aqueous solutions. *Fire Safety Journal*, 105, 188–195. doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.03.005>

3. Karvatska M., Lavreniuk O., Mykhalichko B. (2023). Suchasnyi stan i napriamy vdoskonalennia vodnykh vohnehasnykh rehovyn [Current status and directions for improving water-based fire extinguishing agents.]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, 1(15), 92–100. doi: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1\(15\).92-100](https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1(15).92-100)

4. Anatolii Kodrik, Oleksandr Titenko & Andriy Shvydenko (2022). Theoretical Prerequisites for Creating a Fire-Extinguishing Solution Based on Water-Absorbing Polymer Ecoflocf-07 for Extinguishing Fires in Ecosystems. *Key Engineering Materials*, 927, 87–104. doi: <https://doi.org/10.4028/p-647flv>

5. Dadashov I. (2019). *Rozvytok naukovykh osnov hasinnia horiuchykh ridyn tverdymy porystymy materialamy ta heleutvoriuyuchy systemamy [Development of scientific foundations for extinguishing flammable liquids with solid porous materials and gel-forming systems]*: Doktor Dissertation. Kharkiv.

6. Mahlovana T. (2014). *Fyzyko-khimichni vlastyvoli vodnykh vohnehasnykh rehovyn na osnovi*

poliheksametylenhuanidynu. *Pozhezhna bezpeka: teoriia i praktyka: zb. nauk. prats*, 17, 67–72.

7. Mark Voozoo (2018). *Fire inhibitor formulation*. (Patent USA US9920250B).

8. Skorobahatko T., Antonov A., Borovykov V. Osoblyvosti protsesiv horinnia dyzelnoho biopalyva, yoho sumishei z naftovym dyzelnym palyvom ta protsesiv vzaiemodii vohnehasnykh rehovyn z polumiam pid chas yikh hasinnia [Features of the combustion processes of diesel biofuel, its mixtures with petroleum diesel fuel and the processes of interaction of fire extinguishing agents with flames during their extinguishing]. *Internauka: Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal*, 2 t. Rozdil Tekhnichni nauky, 2019, 11(73), 52–63. doi: 10.25313/2520-2057-2019-11-5112

9. Kodryk A., Kovalenko V. & Borysova, A. (2022). Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti vodnykh vohnehasnykh rehovyn na osnovi ridkoho skla [Ways to increase the efficiency of aqueous fire extinguishing agents based on liquid glass.]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, 1(13), 24–34. doi: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.1\(13\).24-34](https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.1(13).24-34)

10. Anatolii Kodrik, Oleksandr Titenko & Andriy Shvydenko (2022). Theoretical Prerequisites for Creating a Fire-Extinguishing Solution Based on Water-Absorbing Polymer Ecoflocf-07 for Extinguishing Fires in Ecosystems. *Key Engineering Materials*, 927, 87–104. doi: <https://doi.org/10.4028/p-647flv>

11. Fanbao Chen, Bin Yao & Xinyu Wang (2023). Experiment study on fire extinguishing effects of airflow-water synergistic jet. *Case Studies in Thermal Engineering*, 49, 103367. doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103367>.

12. Yang Liu, Zhixi Fu & Peng Chen (2022). Study on the effect of mist flux on water mist fire extinguishing. *Fire Safety Journal*, 130, 103601. doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2022.103601>

13. Hüsniğül Yılmaz-Atay, Jacek Lukasz, Wilk-Jakubowski (2022). A Review of Environmentally Friendly Approaches in Fire Extinguishing: From Chemical Sciences to Innovations in Electrical Engineering. *Polymers*, 14(6), 1224. doi: <https://doi.org/10.3390/polym14061224>

14. Fanbao Chen, Bin Yao & Xinyu Wang (2023). Improving the fire-extinguishing effect of pneumatic extinguishers with airflow-spray synergistic jet: Investigation of nozzle position and number of nozzles. *Case Studies in Thermal Engineering*, 47, 103124. doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103124>

15. Korotynskyi P. and others (2016). *Dovidnyk kerivnyka hasinnia pozhezhi [Firefighting manager's handbook]*. Kyiv : TOV LiteraDruk.

16. Zhai, XW., Pan, WJ. & Ouyang L. (2021). Inhibition of coal spontaneous combustion by an environment-friendly, water-based fire extinguishing agent. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 144, 325–334. doi: <https://doi.org/10.1007/s10973-020-10101-6>

17. Saveliev D. (2020). *Pidvyshchennia efektyvnosti hasinnia nyzovykh lisovykh pozhezh shliakhom vykorystannia binarnykh vohnehasnykh system z rozdilnym podavanniam [Increasing the efficiency of extinguishing grassroots forest fires by using binary fire extinguishing systems with separate supply]*: PhD Dissertation. Kharkiv.

18. Zhang, M., Liu, J. & Geng, M. (2023). Fire Extinguishing Effect of Reignition Inhibitor on Lithium Iron Phosphate Storage Battery Module. *The proceedings of the 10th Frontier Academic Forum of Electrical Engineering (FAFEE2022)*. FAFEE 2022. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. Springer, Singapore, 1054, 703–711. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-99-3408-9_60

19. Zhang, L., Jin, K. & Wang, Q. (2024). A Review of Fire-Extinguishing Agents and Fire Suppression Strategies for Lithium-Ion Batteries Fire. *Fire Technology*, 60, 817–858. doi: <https://doi.org/10.1007/s10694-022-01278-3>

20. Zhou, Y., Wang, Z. & Di, J. (2022). Inhibitory effect of water mist containing composite additives on thermally induced jet fire in lithium-ion batteries. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147, 2171–2185. doi: <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10673-x>

21. Wang, H., Zhang, Y., Zhao, Z. (2025). Study on the Fire Suppression Efficiency of Common Extinguishing Agents for Lithium Iron Phosphate Battery Fires. *Fire Technology*. doi: <https://doi.org/10.1007/s10694-024-01687-6>

22. Mohammad Hamdan, Suleiman Enjadat, Ahmad Sakhrieh (2024). Flame inhibition using nanotechnology. *International Journal of Thermofluids*, 21, 100583. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100583>

23. Anna Rabajczyk, Maria Zielecka, Justyna Gniazdowska (2022). Application of Nanotechnology in Extinguishing Agents. *Materials (Basel)*, 15(24), 8876. doi: <https://doi.org/10.3390/ma15248876>

24. Li Haoyang, Zhiming Du (2024). Study on the development of aerial fire extinguishing munition for forest fires and fire extinguishing tests. *Case Studies in Thermal Engineering*, 55, 104138. doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104138>

25. Haoyang Li, Jinyuan Hao, Zhiming Du (2023). Study on the Minimum Fire-Extinguishing Concentration of Several Commonly Used Extinguishing Agents to Suppress Pyrolysis Gas of Red Pine Wood. *ACS Omega*, 8(8), 7757–7766. doi: <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c07424>

26. Edward Goldberg (2022). Industry Standard: Understanding the Science of Chemical Retardants. *International Association of Wildland Fire*. Retrieved from: <https://www.iawfonline.org/article/industry-standard-understanding-the-science-of-chemical-retardants>

27. Stephen Conboy (2021). *Methods of suppressing wild fires raging across regions of land in the direction of prevailing winds by forming anti-fire (AF) chemical fire-breaking systems using environmentally clean*

anti-fire (AF) liquid spray applied using GPS-tracking techniques. (Patent US10653904B2).

28. Xiyu Wang, Yuanbo Xue & Zhiyong Cai (2024). Planning and Evaluation of Water-Dropping Strategy for Fixed-Wing Fire Extinguisher Based on Multi-Resolution Modeling. *Aerospace*, 11(11), 929. doi: <https://doi.org/10.3390/aerospace11110929>

29. D. Dubinin, A. Lisniak & Y. Senchykhin (2024). Studying fire extinguishers with the combined supply of the foam-water extinguishing agents in an aerosol state. *SIGURNOST*, 66(4), 319–332. doi: <https://doi.org/10.31306/s.66.4.2>

30. Xiang Wang, Jun-Cheng Jiang & An-Chi Huang (2024). Efficacy evaluation of bicarbonate formulations dry water fire extinguishing agents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 92, 105444. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2024.105444>

31. Du, C. Y., Yang, Y. & Dong X.-L. (2024). Effectiveness evaluation of fine water mist venturi nozzle systems with composite additives in improving fire suppression in polyurethane fires. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 149, 13495–13510. doi: <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13666-8>

© В.-П. О. Пархоменко, Б. М. Михалічко, О. І. Лавренюк, Р. В. Пархоменко, І. П. Кравець

Оглядова стаття

Надійшла до редакції 20.04.20205

Прийнято до публікації 04.06.2025



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.46.2025.11>

Р. Л. Пелех, В. М. Марич

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

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9078-8131> – Р. Л. Пелех

<https://orcid.org/0000-0001-7051-4494> – В. М. Марич



marychvolodj@ukr.net

АНАЛІЗ ЧИННИКІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМ ПОЖЕЖОГАСІННЯ ТОНКОРОЗПИЛЕНОЮ ВОДОЮ

Вибір системи пожежогасіння як у житлових, комерційних, так і на об'єктах, які мають високу культурну та історичну цінність, залишається актуальним. Збереження матеріальних, історичних та культурних цінностей не тільки від вогню, але й від пошкоджень, які можуть бути спричинені використанням великої кількості води під час ліквідації пожежі, покладає перед проєктантами важке завдання вибору типу системи пожежогасіння, особливо на об'єктах, пожежі на яких не можуть гаситись класичними системами спринклерного або дренчерного пожежогасіння, а використання газового пожежогасіння є неможливим через його високу вартість або негерметичність об'єкта.

Сьогодні у 90 % на об'єктах монтуються системи спринклерного пожежогасіння. Такий метод є ефективним, проте він передбачає використання великих об'ємів води, що тягне за собою необхідність забезпечення великих площ для розміщення резервуарів та обладнання. Іншою проблемою є шкода, якої завдають приміщенням, прилеглим до зони пожежі, та майну, які природно зазнають впливу води. Гасіння пожежі тонкорозпиленою водою (далі – ТРВ) довело свою ефективність у світі, тому запроваджено можливість використання цієї технології в нашій країні.

Наведено аналіз механізмів гасіння і чинників, що впливають на ефективність систем пожежогасіння тонкорозпиленою водою (далі – СПГ ТРВ) для гасіння пожеж, переваги їх використання порівняно із системами газового та спринклерного пожежогасіння, вплив на час евакуювання людей, а також збереження матеріальних, історичних та культурних цінностей.

Метою роботи є визначення основних чинників, які необхідно врахувати під час подальших досліджень та розроблення розпилювачів, для досягнення необхідного розподілу крапель за розмірами, щільності та інтенсивності зрошення, а також можливості їх використання в комбінаціях води з іншими добавками, які підвищують вогнегасну здатність систем та пришвидшують процес гасіння пожеж.

Ключові слова: системи пожежогасіння, тонкорозпилена вода, туман, водяний туман.

R. L. Pelekh, V. M. Marych

*Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine
Lviv, Ukraine*

ANALYSIS OF FACTORS THAT INFLUENCE ON THE EFFICIENCY OF FIRE EXTINGUISHING SYSTEMS WITH FINE SPRAY WATER

The choice of fire extinguishing systems in residential, commercial and objects of high cultural and historical importance remains relevant. The preservation of material, historical and cultural values not only from fire, but also from damage that can be caused by the use of large amounts of water in firefighting impose a difficult task on designers to choose the type of fire extinguishing system, especially in facilities where fires cannot be extinguished by classical sprinkler or drencher fire extinguishing systems, and the use of gas fire extinguishing is impossible due to its high cost or leakage of the facility.

Currently, 90 % of facilities are equipped with sprinkler fire extinguishing systems. This method is effective, but it involves the use of large volumes of water, which entails the need to provide large areas for tanks and equipment. Another problem is the damage caused to the premises adjacent to the fire zone and property that

is naturally exposed to water. Fire extinguishing with fine sprayed water (hereinafter referred to as FW) has proven to be effective in the world, and therefore the possibility of using this technology in our country has been introduced.

An analysis of the extinguishing mechanisms and factors influencing on the effectiveness of fire extinguishing systems with fine spray water (hereinafter referred to as FES FSW) for extinguishing fires, the advantages of their use compared to gas and sprinkler fire extinguishing systems, the impact on the time of evacuation of people, as well as the preservation of material, historical and cultural values.

The aim of the study is to identify the main factors that need to be taken into account in further research and development of spray nozzles to achieve the required droplet size distribution, density and intensity of irrigation, as well as the possibility of using them in combinations of water with other additives, which will increase the fire extinguishing capabilities of the system and speed up the fire extinguishing process.

Key words: fire extinguishing systems, finely sprayed water, fog, water mist.

Постановка проблеми. В умовах сучасного розвитку економіки, продовження агресії росії та необхідності відновлення втрачених через військові дії об'єктів промисловості та цивільного будівництва, а також необхідності збереження об'єктів, майна та культурної спадщини питання захисту об'єктів від пожежі залишається актуальним. Сьогодні у 90 % на об'єктах монтується системи спринклерного пожежогасіння. Такий метод є ефективним, проте він передбачає використання великих об'ємів води, що тягне за собою необхідність забезпечення великих площ для розміщення резервуарів та обладнання. Іншою проблемою є шкода, якої завдають приміщенням, прилеглим до зони пожежі, та майну, які природно зазнають впливу води.

Гасіння пожежі тонкорозпиленою водою (далі – ТРВ) довело свою ефективність у світі, тому запроваджено можливість використання цієї технології і в нашій країні. В межах гармонізації українського законодавства з міжнародними та європейськими нормативними документами в Україні з 1 серпня 2016 року було дозволено використання CEN/TS 14972:2011 і введено в дію відповідний нормативний документ ДСТУ CEN/TS 14972:2016 «Стационарні системи пожежогасіння. Системи пожежогасіння тонкорозпиленою водою. Проектування та монтування» [1], а з 1 листопада 2019 року вступили в дію зміни до ДБН В.2.5-56:2014 «Системи протипожежного захисту» [2]. Зокрема, введено можливість під час проектування систем протипожежного захисту передбачати сучасні СПГ ТРВ, які часто є ефективнішими за класичні дренчерні або спринклерні системи пожежогасіння.

Однак системи пожежогасіння ТРВ потребують доопрацювання у зв'язку з наявними недоліками, які виникають через саму природу такого типу систем пожежогасіння. Основними з них є такі:

- вплив вентиляції та протягів: дрібні краплі легко відхиляються від зони горіння через повітряні потоки;

- обмежена дальність розпилення: ефективна дальність дії розпилювачів зазвичай не перевищує 3–4 метрів;

- складність гасіння тліючих пожеж: недостатня змочувальна здатність для проникнення в глибокі шари горючих матеріалів;

- висока чутливість до забруднень: малий діаметр сопел призводить до частого забивання та виходу з ладу;

- залежність від тиску в системі: для ефективного розпилення потрібне стабільне високе значення тиску.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивчення та опис фундаментальних принципів гасіння пожеж рідкого та твердого палива водяним туманом можна простежити з середини 1950-х років [9; 10]. Ранні дослідження були зосереджені на механізмах гасіння водяного туману та оптимальних параметрів крапель ефективного гасіння пожеж. Було показано, що водяний туман з дрібнодисперсними розпилювачами є дуже ефективним для контролю пожежі рідкого та твердого палива, а також для запобігання вибуху вуглеводневих сумішей [11]. Проведення досліджень продовжується як українськими науковцями [12–16], так й іноземними [17–20], переважно спрямовуючись на використання тонкорозпиленої води як вогнегасної речовини пожежними бригадами та використання тонкорозпиленої води в системах пожежогасіння. Напрямок розвитку систем пожежогасіння тонкорозпиленою водою здебільшого розвивається за межами України.

Мета статті (постановка завдання) – провести аналіз механізму гасіння та чинників, що впливають на ефективність СПГ ТРВ, визначити потребу в напрямках для покращення роботи СПГ ТРВ та з'ясувати подальші можливості для удосконалення систем.

Виклад основного матеріалу. Стандартами для розроблення СПГ ТРВ є NFPA 750 «Стандарт на Системи протипожежного захисту від водяного туману» в США [3], Європейський стандарт EN 14,972 [4], британський BS 8489

[5], американський UL 2167 [6], китайський GA 1149:2014 [7] та австралійський AS 4587:1999 [8].

Під способом пожежогасіння тонкорозпиленою водою розуміють спосіб внесення в зону пожежі дрібнодисперсно розпиленої води, в якій 99 % об'єму розпилення припадають на краплі діаметром менше 1 000 мікрон [3]. Таким чином створюється так званий водяний туман.

Використання водяного туману в пожежогасінні, порівняно з використанням газоподібних речовин і звичайних спринклерних, має достатньо переваг:

- відсутність проблем з токсичністю та задухою;
- екологічність системи за рахунок можливості використання чистої води;
- низька вартість системи порівняно із системами газового пожежогасіння;
- зменшення або повна відсутність шкоди порівняно з використанням спринклерних або дренчерних систем;
- висока ефективність під час гасіння певних видів пожеж.

Використання СПГ ТРВ спрямовані на вирішення проблеми поступової відмови від фреонів згідно з Монреальським протоколом 1989 року, а також гідрофторвуглеців (ГФВ) після поправки Кігалі 2016 року. Вони, можливо, представлятимуть наступне покоління водяних систем пожежогасіння, оскільки їх можна застосовувати для гасіння багатьох класів пожеж.

СПГ ТРВ настільки ж ефективні, як спринклери проти пожеж класу А (звичайні тверді горючі речовини), за винятком випадків, коли матеріал занадто товстий для проникнення дрібних крапель задля зволоження та охолодження поверхні. Їхня продуктивність також сильно залежить від насадки, положення відносно вогню та наявності екранування або вентиляції. Вони є також ефективними проти пожеж класу В (займисті рідини), оскільки не викликають розбризкування, за умови, що імпульс їх розпилення доволі низький. Дослідження показали, що водяний туман також ефективний проти пожеж класу С (займисті гази). Для гасіння пожеж класу F (кулінарні олії та жири) можливе використання локальних систем пожежогасіння, в яких вода поєднується з добавками, які мають здатність створювати плівку на поверхні горіння та містять добавки, які є інгібіторами горіння.

Пожежі в закритих просторах характеризуються високим виділенням теплової енергії. Радіаційна та конвекційна передача тепла поширюється на стіни та покриття і випромінюється в різних напрямках. Під час згоряння утворюється

велика кількість СО та сажі, які накопичуються у верхній частині відсіку. Ця енергія безперервно випромінюється в оточення пожежі та призводить до підвищення температури і піролізу матеріалів. Невдовзі вона перевищує температуру самозаймання більшості горючих матеріалів і викликає спалах у зоні пожежі. Для гасіння пожежі, перш ніж вона виходить з-під контролю, необхідно використовувати системи пожежогасіння. Однією з таких систем є система пожежогасіння тонкорозпиленою водою, яка створює дрібні бризки крапель води, діаметр яких менше 1000 мкм, і зазвичай коливається від 100 мкм до 400 мкм. Розпорошені краплі поглинають тепло полум'я та порушують самостійність ланцюгової реакції пожежі. За рахунок того, що діаметр крапель значно менший для водяного туману, ніж для традиційних спринклерів, а більше крапель розпорошується, загальна площа поверхні крапель більша. При цьому тепло поглинається швидше, ніж з традиційними спринклерами. Під час поглинання тепла вода перетворюється на пару і розширюється в об'ємі з кратністю 1 700. Через брак окислювача для підтримки реакції горіння припиняється. На початковому етапі пожежі, крім гасіння та охолодження за рахунок осаджування продуктів горіння, евакуація людей із зони загоряння пришвидшується.

Механізми пожежогасіння. Вода має одні з кращих фізичних властивостей для гасіння пожеж. Її висока теплоємність (4,5 Дж/г·К) та висока питома теплота випаровування (2 442 Дж/г) здатні поглинати значну кількість тепла від полум'я та зони горіння. Вода також розширюється в 1 700 разів, коли випаровується до пари, що призводить до зменшення концентрації кисню і парів палива. Під час утворення дрібних крапель ефективність води в пожежогасінні ще більше підвищується завдяки значному збільшенню площі поверхні води, доступної для поглинання та випаровування тепла. Водяний туман під час пожежогасіння, однак, не поводить як «справжній» газоподібний агент. Коли вода впорскується в приміщення, не всі бризки, що утворюються, безпосередньо беруть участь у гасінні пожежі. Вони розділяються на низку фракцій таким чином [21]:

- краплі, які перетворюються на пару, не досягнувши вогнища пожежі;
- краплі, які проникають у факел пожежі або іншим чином досягають палаючих поверхонь під факелом пожежі, щоб інгібувати піроліз шляхом охолодження, а пара, що утворюється в результаті, розбавляє гази, що утворюються в результаті горіння, а також та наявний кисень;

- краплі, які потрапляють на стіни, підлогу та стелю відсіку та охолоджують їх або іншим чином стікають у відходи;

- краплі, які попередньо змочують сусідні горючі речовини для запобігання поширенню вогню.

Брайдех і Расбаш у своїх ранніх дослідженнях [9; 10] визначили два механізми, за допомогою яких водяний туман гасить пожежі: витіснення кисню і відведення тепла в результаті випаровування водяного туману в зоні, що оточує пожежу. Дослідження, проведені наразі, не змінили точності цих механізмів гасіння. Автори класифікували механізми гасіння водяного туману під час гасіння пожеж на первинні та вторинні [22], які можна узагальнити таким чином.

Первинні механізми:

- відведення тепла, охолодження факелу пожежі, змочування/охолодження поверхні зони горіння і навколишніх предметів;

- витіснення кисню, розбавлення парів палива.

Вторинні механізми передбачають зменшення кінетичного та радіаційного перенесення тепла, динамічне перемішування парів горіння та вирівнювання температури по об'єму.

Механізми охолодження водяного туману для пожежогасіння можна умовно поділити на охолодження вогняного факелу та змочування/охолодження поверхні палива. Охолодження полум'я водяним туманом пояснюється перш за все перетворенням води на пару, яке відбувається через високий відсоток дрібних крапель води, що потрапляє у факел пожежі і швидко випаровується. Пожежа буде погашена, коли адіабатична температура полум'я знизиться до нижньої температурної межі, що призводить до припинення реакції горіння паливно-повітряної суміші.

Під час утворення дрібних крапель площа поверхні водної маси і швидкість, з якою розпилювач поглинає тепло від гарячого газу і полум'я, значно збільшуються. Як зазначають Канурі [23] і Гертеріх [24], швидкість випаровування краплі залежить від температури довкілля, площі поверхні краплі, коефіцієнта тепловіддачі та відносної швидкості краплі до навколишнього газу.

Змочування/охолодження зони пожежі водяним туманом також зменшує швидкість піролізу палива і запобігає повторному займанню під час охолодження палива. Для речовин з низькою температурою спалаху потрібно більше водяних розпилювачів паливної поверхні, оскільки для утворення парів потрібно менше тепла. Первинна реакція горіння з таким видом палива, як тверде паливо, відбувається в зоні з високим

вмістом вуглецю, яка утворюється на поверхні палива. Отже, охолодження дифузійного полум'я над сформованою зоною обуглювання твердого палива може бути недостатнім для досягнення придушення [25]. Для охолодження поверхні палива або необхідно застосовувати водяний туман до того, як утвориться глибока зона обуглювання, або краплі води повинні проникнути в зону обуглювання, щоб досягти фактичної межі розділу між згорілим і незгорілим паливом.

Витіснення кисню може відбуватися як у масштабі відсіку, так і в локальному об'ємі [26].

На рівні відсіку концентрація кисню у відсіку суттєво зменшиться за рахунок швидкого випаровування і розширення дрібних крапель води до пари, коли водяний туман вприскується в гарячий відсік і поглинає тепло від пожежі, гарячих газів і поверхонь. Результати розрахунків показали, що концентрація кисню в приміщенні об'ємом 100 м³ може зменшитися приблизно на 10 %, коли 5,5 л води повністю перетворяться на пару [27].

Зменшення концентрації кисню в приміщенні за рахунок водяного туману залежить від розміру пожежі, тривалості горіння, об'єму відсіку та умов вентиляції в приміщенні. Зі збільшенням розміру пожежі або тривалості часу пожежі відбувається як зменшення концентрації кисню внаслідок пожежі, так і витіснення кисню внаслідок утворення більшої кількості водяної пари, спричиненої високим підвищенням температури у відсіках. Цей комбінований ефект значно знижує концентрацію кисню в приміщенні і підвищує ефективність водяного туману для гасіння пожежі.

У локальному масштабі, коли водяні бризки проникають у факел пожежі і перетворюються на пару, вони розширюються в 1 700 разів порівняно з рідким станом. Коефіцієнт об'ємного розширення води, що випаровується, перешкоджає проникненню повітря (кисню) в полум'я і розбавляє газову суміш, доступну для згорання. В результаті, коли пари пожежі розбавляються нижче нижньої межі займистості паливно-повітряної суміші або коли концентрація кисню, необхідна для підтримки горіння, знижується нижче критичного рівня, пожежа буде погашена.

Водяна пара як інертний агент у пожежогасінні широко вивчалася. Розандер і Гізельссон [27] описали процес гасіння пожежі за допомогою утворення пари як «непряме гасіння». Вони рекомендують використовувати 35 % суміш води в навколишньому газі для гасіння пожежі шляхом утворення пари. З аналізу комп'ютерного моделювання Длугогорський та інші науковці [28] показали, що для ефективного гасіння необхідна концентрація водяної пари в суміші горючих газів,

яка залежить від температури довкілля, досягаючи 36 % і 44 % для температур довкілля 100 °C і 300 °C відповідно.

Вплив розбавлення кисню водяним туманом на гасіння пожежі сильно залежить від класу пожежі [25]. Це пов'язано з тим, що мінімальна кількість вільного кисню, необхідного для підтримки горіння, залежить від типу горючого матеріалу. Для більшості вуглеводневих палив критична концентрація кисню для підтримки горіння становить приблизно 13 % [25]. Для твердого палива критична концентрація кисню, необхідна для горіння, є ще нижчою.

Послаблення інфрачервоного випромінювання. Коли водяний туман огортає або досягає поверхні палива, вода може діяти як тепловий бар'єр для запобігання подальшому нагріванню випромінюванням поверхні палива, що горить, а також неспалених поверхонь [30–32]. Крім того, водяна пара в повітрі над поверхнею палива діє як випромінювач сірого тіла, що поглинає інфрачервону енергію, і повторно випромінює її на інші поверхні відбувається зі зменшеною інтенсивністю. Блокування інфрачервоного випромінювання водяним туманом зупиняє поширення вогню на незапалені поверхні і зменшує швидкість випаровування або піролізу на таких поверхнях.

Експериментальні випробування, проведені в Національній дослідницькій раді Канади [33], показали, що променевий потік на стіні випробувального відсіку був зменшений більш ніж на 70 % завдяки активації системи водяного туману. Розрахунок, проведений Логом [32], також показав, що під час навантаження розпилення 100 г/м³ і довжини шляху 1 м розпилення на межі між класом 1 і класом 2 ($Dv_{0.1} = 100$ мкм і $Dv_{0.9} = 200$ мкм) здатне блокувати близько 60 % інфрачервоного випромінювання від чорного тіла за температури 800 °C.

Показано, що ослаблення випромінювання дуже сильно залежить від діаметра та щільності крапель. Заданий об'єм води забезпечить більш ефективніший бар'єр проти випромінювання, якщо він складається з дуже дрібних крапель у щільному розпиленні, ніж туман з більшими краплями. Розрахунок, проведений Равігураджаном і Белтраном [30], показав, що для досягнення однакового ослаблення випромінювання на об'єкті за температури 650 K масова густина крапель розміром 100 мкм повинна бути в 10 разів більшою, ніж у крапель розміром 10 мкм. Довжина хвилі випромінювання, однак, є також важливою для визначення ослаблення випромінювання водяного туману. Туман буде поглинати більше випромінювання, якщо діаметр крапель близький до довжини хвилі випромінювання.

Інші типи впливів водяного туману на зону пожежі, на думку багатьох авторів, є менш суттєвими, хоча для різних класів пожеж можуть мати більший або менший вплив.

Чинники, що впливають на ефективність водяного туману. Визнано, що хоча всі вогнегасні механізми водяного туману тією чи іншою мірою беруть участь у гасінні пожежі туману, проте лише один або два механізми відіграють домінуючу роль [25]. Те, який механізм гасіння є домінуючим, залежить від характеристик водяного туману, сценаріїв пожежі, геометрії приміщення та умов вентиляції. Багато інших чинників, таких як ефект огороження, динамічне перемішування, що створюється потоком водяного туману, типи систем водяного туману, що застосовуються (загальне або локальне застосування), а також використання добавок і режимів розпилення, справляють важливий вплив на ефективність водяного туману під час гасіння пожеж [26; 34; 35].

Ефективність системи в гасінні пожежі безпосередньо пов'язана з характеристиками розпилення, що створюється зрошувачами. Таким чином, можна виділити перелік важливих параметрів водяних зрошувачів для гасіння пожеж:

- середня витрата на одиницю площі в зоні пожежі;
- розподіл швидкості потоку в зоні пожежі та навколо неї;
- напрямок розпилення;
- розмір і розподіл крапель;
- швидкість струменя водоповітряної суміші;
- додаткові хімічні елементи, які вводяться в склад розчину.

Хоча всі ці важливі параметри розпилення можуть бути використані для опису характеристики водяного туману під час пожежогасіння, їх можна звести до трьох основних параметрів: розподіл крапель за розмірами, щільність потоку та імпульс розпилення [1].

Ці три основні параметри водяного туману не тільки безпосередньо визначають ефективність водяного туману для пожежогасіння, але й потенційно визначають відстань між розпилювачами, а також обмеження висоти стелі для конкретної установки.

Розподіл крапель за розмірами, наведений у табл. 1, належить до діапазону крапель, що містяться в репрезентативних зразках хмари розпилення або туману, виміряних у визначених місцях.

NFPA 750 [3] розділив краплі, що утворюються системою водяного туману, на три класи, щоб розрізнити «більші» і «менші» розміри крапель у межах 200–1000-мікронного діапазону.

Таблиця 1

Розподіл діаметру крапель води, та необхідний тиск системи згідно з NFPA 750

Класи	Розмір крапель, мкм	Орієнтовний необхідний тиск системи
клас 1	Dv0.9 < 200	до 12,1 бар
клас 2	200 < Dv0.9 < 400	від 12,1 до 34,5 бар
клас 3	Dv0.9 > 400	понад 34,5 бар

Теоретично дрібні краплі більш ефективні під час гасіння пожежі, ніж великі, через більшу загальну площу поверхні, доступну для випаровування та відведення тепла. Вони більш ефективні в ослабленні радіаційного та конвекційного випромінювання [30]. Крім того, дрібні краплі мають довший час перебування в об'ємі, що дає їм змогу переноситися повітряними потоками у віддалені або закриті частини об'єкта. Вони можуть демонструвати більш газоподібну поведінку і кращу здатність до змішування. Однак дрібним краплям дуже важко проникнути у факел пожежі і досягти поверхні палива через опір і гідродинамічний ефект факелу пожежі. Дрібні краплі з низьким імпульсом легко переносяться від пожежі повітряними потоками. Крім того, для утворення дрібних крапель і перенесення їх до вогню потрібно більше енергії.

Великі краплі можуть легко проникати у факел пожежі, забезпечуючи прямий контакт з вогнем, а також змочувати та охолоджувати горючі речовини. Однак великі краплі мають меншу загальну поверхню для відведення тепла і випаровування. Здатність водяного туману в гасінні загороджених/екранованих пожеж зменшується зі збільшенням розміру крапель.

Крім того, великі краплі з високою швидкістю можуть спричинити розбризкування рідкого палива, що призводить до збільшення розміру пожежі.

Таким чином, можна стверджувати, що оптимальний розмір крапель для пожежогасіння сильно залежить від багатьох чинників, таких як властивості горючої речовини, ступінь перешкод у приміщенні та розмір пожежі. Розподіл крапель за розміром, який найефективніший для гасіння одного сценарію пожежі, не обов'язково буде найкращим для інших сценаріїв. Не існує єдиного розподілу розмірів, який би підходив для всіх сценаріїв пожежі. Насправді ефективність водяного туману з добре змішаним розподілом дрібних і великих крапель краща, ніж за рівномірного розподілу крапель [1; 36]. Крім того, будь-які зміни розміру пожежі, швидкості розпилення (імпульсу) і ефекту огороження змінюють оптимальний розмір крапель для пожежогасіння.

Щільність потоку розпилення – це кількість розпиленої води в одиниці об'єму (л/хв/м³) або на одиницю площі (л/хв/м²) [1]. У масштабі відсіку збільшення щільності потоку зменшить температуру у відсіку, але не матиме значного впливу на концентрацію кисню у відсіку [34]. Без достатньої щільності потоку розпилюваної води для відведення певної кількості тепла від пожежі або для охолодження палива нижче точки займання вогонь може підтримувати себе, підтримуючи високу температуру полум'я і високу температуру зони горіння.

Оскільки водяний туман не поводить себе як «справжній» газоподібний агент, важко встановити «критичну концентрацію» крапель води, необхідну для гасіння пожежі (тобто мінімальну сумарну масу води в краплях на одиницю об'єму або на одиницю площі для гасіння пожежі) [1; 37; 38]. Кількість туману, що досягає пожежі, визначається багатьма чинниками. До них належать імпульс і кут розпилення, екранування, розмір пожежі, умови вентиляції та геометрія відсіку.

Крім того, сучасна технологія розпилення і відповідне розташування розпилювачів у відсіку не можуть забезпечити рівномірну щільність потоку розпилення. Щільність потоку розподіл водяного туману в межах конуса розпилення однієї форсунки неоднорідний. Деякі типи розпилювачів для виробництва водяного туману концентрують великий відсоток водяного туману в центрі конуса, тоді як інші типи розпилювачів можуть мати меншу концентрацію водяного туману в центральній частині [34; 39]. Коли конуси розпилення від групи розпилювачів перекриваються, щільність потоку в будь-якій точці також відрізняється від тієї, що спостерігається з однією форсункою через динаміку взаємодії розпилювачів.

Ендрюс [38] порівняв мінімальні витрати, необхідні для гасіння твердопаливних пожеж, запропоновані 19 авторами. Виявлено, що ці мінімальні витрати широко варіюються залежно від умов застосування, і жодна «критична концентрація» водяного розпилювача не може відповідати всім випадкам застосування.

Імпульс розпилення належить до маси розпилення, швидкості розпилення та його напрямку відносно факела пожежі. Імпульс розпилення визначає не тільки те, чи можуть краплі води проникнути в полум'я або досягти поверхні палива, але й швидкість втягування навколишнього повітря у факел пожежі. Турбулентність, що створюється розпилювачем, змішує дрібні краплі води і водяну пару в зоні горіння, що розбавляє кисень і пари пального та підвищує вогнегасну ефективність водяного туману під час пожежогасіння.

Маса розпилення визначається в імпульсі розпилення, отже, включає не тільки масу рідкої фази води, але й масу води в пароподібній фазі та повітря, захопленого водяним туманом [26].

Імпульс розпилення води визначається багатьма чинниками. До них належать розмір і швидкість крапель, тиск нагнітання і кут конуса розпилювача, відстань між форсунками, умови вентиляції і геометрія відсіку. [26]. Крім того, імпульс розпилення буде поступово зменшуватись, оскільки дрібні краплі води проходять через гарячий газ, а швидкість і розмір крапель зменшуються через гравітаційні сили та сили опору на краплі під час випаровування [40]. Відстань від сопла, яку повинні пройти краплі води перед падінням у повітря, визначається імпульсом розпилення та кутом конуса розпилення [40].

Відстані падіння значно зменшуються зі зменшенням розміру краплі та підвищенням температури довкілля. Отже, за високої стелі імпульс дрібних крапель води стане дуже малим, перш ніж вони досягнуть вогню. Такі дрібні водяні бризки з низьким імпульсом не зможуть пробитися крізь сильний висхідний факел вогню і досягти пожежі, що призведе до нездатності придушити пожежу.

Щоб уникнути захоплення туману (і водяної пари) вогняним шлейфом, імпульс туману повинен бути щонайменше рівним за величиною і протилежним за напрямком імпульсу вогняного факелу [26].

Імпульс розпилення також особливо важливий для зонованих систем пожежогасіння водяним туманом та для пожеж з високим ступенем перешкод. Для таких пожеж водяний туман повинен спрямовуватися безпосередньо на вогонь і гасити його за рахунок придушення полум'я та охолодження палива.

Додатково в подальшому варто розглянути ефективність систем пожежогасіння у разі пожеж у закритих приміщеннях за рахунок створення ефекту оболонки, динамічного переміщення парів пожежі та рівномірного розподілу температури по всьому об'єму простору пожежі. Окремих досліджень потребують питання вибору типів форсунок, способу генерації вогнегасної речовини та можливість додавання до води добавок, які зможуть покращити процес гасіння пожежі.

Висновки. Механізми гасіння систем водяного туману були визначені як охолодження джерела пожежі, витіснення кисню і продуктів горіння, а також зменшення теплового випромінювання. Чинниками, які впливають на ефективність гасіння пожеж СПГ ТРВ, є правильна побудова розпилювача, яка буде впливати на розподіл крапель за розмірами, щільності та інтенсивності зрошення,

та комбінація води з іншими добавками, яка підвищить вогнегасні здатності системи.

Можна виділити такі подальші напрями для вдосконалення СПГ ТРВ, які покращать ефективність гасіння пожеж:

- розроблення нових типів форсунок: створення форсунок з адаптивною геометрією та механізмами самоочищення;
- оптимізація розміру крапель: дослідження оптимального розміру крапель для різних типів пожеж (20–1 000 мкм);
- впровадження багаторежимних систем: розроблення систем, що можуть змінювати параметри розпилення залежно від умов пожежі;
- модифікація води та використання добавок: використання поверхнево-активних речовин (ПАР), пінних та інших хімічних елементів для кращого проникнення в матеріали, інгібування горіння та підвищення ефективності системи;
- поєднання переваг водяного туману та інертних газів.

Поєднання лабораторних досліджень і комп'ютерного моделювання з перевіркою на пожежних випробуваннях є необхідною умовою підвищення ефективності систем пожежогасіння тонкорозпиленою водою.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ CEN/TS 14972:2016 «Стаціонарні системи пожежогасіння. Системи пожежогасіння тонкорозпиленою водою. Проектування та монтажування». (CEN/TS 14972:2011, IDT).
2. ДБН В.2.5-56:2014. Системи протипожежного захисту.
3. National Fire Protection Association: NFPA 750 (2023). Technical report.
4. European Committee for Standardization: EN 14972-1 (2020) Technical report.
5. British Standards Institution: BS 8489-1 (2016) Technical report Fire Technology 2024.
6. UL: UL 2167 (2011) Technical report.
7. People's Republic of China Public Security Industry Standards: GA 1149 (2014) Technical report.
8. Standards Australia Committee FP/12: AS 4587 (2020) Technical report.
9. Braidech, M. M., Neale, J. A., Matson, A. F. and Dufour, R. E., The Mechanisms of Extinguishment of Fire by Finely Divided Water, Underwriters Laboratories Inc. for the National Board of Fire Underwriters, NY, p. 73, 1955.
10. Rasbash, D. J. and Rogowski, Z. W. Extinction of Fires in Liquids by Cooling with Water Sprays. Combustion and Flame, Vol. 1, 1957.
11. McCaffrey, B. J. Jet Diffusion Flame Suppression Using Water Sprays: An Interim Report. Combustion Science and Technology, Vol. 40, 1984, pp. 107–136.

12. Дубінін Д. П. Обґрунтування та визначення сфери застосування засобів пожежогасіння тонкорозпиленою водою. *Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення*: зб. наук. праць Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю. Львів : ЛДУ БЖД, 2022. С. 341–343.
13. Кириченко О. В., Абрамов Ю. О., Собина В. О. Дослідження ефективності застосування тонкорозпиленої води під час гасіння пожеж у житлових приміщеннях. *Науковий вісник НУЦЗУ*. 2021. № 2(24). С. 110–117.
14. Балагура Є. Г., Ніжник В. В. Експериментальні дослідження параметрів розпилення води системами пожежогасіння високого тиску. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2022. № 1(11). С. 4–12.
15. Антошкін О. А., Рак Т. Є. Моделювання динаміки розповсюдження тонкорозпиленої води в умовах пожежі. *Пожежна безпека*. 2020. № 36. С. 6–12.
16. Зобенко Н. В., Ковальов А. І. Експериментальні дослідження модифікованих водних розчинів для систем пожежогасіння тонкорозпиленою водою. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2023. № 2. С. 45–52.
17. Yu, H. Z. (2022). Fire suppression with water mist: The effect of drop size distribution. *Fire Safety Journal*, 127, 103473. DOI: 10.1016/j.firesaf.2021.103473
18. Xin, Y., Beji, T., & Merci, B. (2021). Numerical study of water mist suppression of small-scale compartment fires. *Fire Technology*, 57(1), 19–41. DOI: 10.1007/s10694-020-01030-9
19. Holmstedt, G., & Persson, H. (2019). Water mist systems – Research, standards and components. *Fire Safety Journal*, 105, 350–368. DOI: 10.1016/j.firesaf.2019.02.011.
20. Zheng, B., Liu, Y., Liu, R., & Xiao, S. (2021). Enhanced fire suppression of water mist with addition of charged particles. *Applied Sciences*, 11 (3), 1289. DOI: 10.3390/app11031289
21. Pietrzak, L. M. and Ball, J. A. A Physically Based Fire Suppression Computer Simulation – Definition, Feasibility Assessment, Development Plan, and Applications, Mission Research Corporation, MRC-R-732, April 1983.
22. Mawhinney, J. R., Dlugogorski, B. Z. and Kim, A. K. A Closer Look at the Fire Extinguishing Properties of Water Mist, *Fire Safety Science – Proceedings of Fourth International Symposium, 1994*, pp. 47–60.
23. Kanury, A. M. Introduction to Combustion Phenomena, Eighth Edition, Gordon and Breach Science Publishers, USA, 1994.
24. Herterich, A. O. Library of the Science of Fire Protection and Related Areas: Section 3: The Diffuse Jet – Spray Jet, The Dr. Alfred Huthig Publishing Co., Heidelberg, 1960.
25. Drysdale, D. An Introduction to Fire Dynamics, John Wiley and Sons, NY, 1985.
26. Mawhinney, J. R. and Back, G. G. Bridging the Gap Between Theory & Practice: Protecting Flammable Liquid Hazards Using Water Mist Fire Suppression Systems, *Fire Suppression and Detection Research Application Symposium, Orlando, Florida, Feb., 1998*.
27. Rosander, M. and Giselsson, K., Making the Best Use of Water for Fire Extinguishing Purposes, *Fire*, Oct., 1984, pp. 43–46.
28. Dlugogorski, B. Z., Hichens, R. K., Kennedy, E. M. and Bozzelli, J.W. Water Vapour as an Inerting Agent, *Proceedings: Halon Alternatives Technical Working Conference, 1997*, p. 7.
29. Mawhinney, J. R., Dlugogorski, B. Z. and Kim, A. K. A Closer Look at the Fire Extinguishing Properties of Water Mist, *Fire Safety Science – Proceedings of Fourth International Symposium, 1994*, pp. 47–60.
30. Ravigururajan, T. S. and Beltran, M. R. A Model for Attenuation of Fire Radiation Through Water Droplets, *Fire Safety Journal*, Vol. 15, 1989, pp. 171–181.
31. Coppalle, A. Fire Protection: Water Curtains, *Fire Safety Journal*, Vol. 20, 1993, pp. 241–255.
32. Log, T. Radiant Heat Attenuation in Fire Water Sprays, *Fire Safety Science Proceedings of Fourth International Symposium, 1996*, pp. 425–434.
33. Mawhinney, J. R. Water Mist Fire Suppression Systems: Principles and Limitations, *International Conference on Fire Protection in the HVDC Industry, Vancouver, Canada, 1995*.
34. Back, G. G. A Quasi-Steady State Model for Predicting Fire Suppression in Spaces Protected by a Water Mist System, Master's Thesis, University of Maryland, December, 1996.
35. Liu, Z. and Kim, A. K. Water Mist as a Halon Alternative: Its Status and Development, 1997 Society of Fire Protection Engineers Seminar, Los Angeles, CA, U.S.A, May, 1997.
36. Mawhinney, J. R. Characteristics of Water Mists for Fire Suppression in Enclosures, *International Conference on Water Mist Fire Suppression Systems, Sweden, 1993*.
37. Hansen, R. USCG Full Scale Water Mist Testing Vertical & Horizontal Scaling, *Proceedings: International Conference on Fire Research and Engineering, 1995*, p. 313.
38. Andrews, S. P. Literature Review: Fire Extinguishing by Water Sprays, Building Research Establishment, UK, Internal Report, 1992.
39. Mawhinney, J. R. Characteristics of Water Mists for Fire Suppression in Enclosures, *International Conference on Water Mist Fire Suppression Systems, Sweden, 1993*.
40. Andersson, P., Arvidson, M. and Holmstedt, G. Small Scale Experiments and Theoretical Aspects of Flame Extinguishment with Water Mist, Technical Report 3080, Dept. of Fire Safety

REFERENCES

1. DSTU CEN/TS 14972:2016. Statsionarni systemy pozhezhohasinnia. Systemy pozhezhohasinnia tonkorozpylenoiu vodoiu. Proektuvannia ta montuvannia [Fixed fire-fighting systems. Water mist systems. Design and installation] (CEN/TS 14972:2011, IDT).
2. DBN V.2.5-56:2014 Systemy proty pozhezhnoho zakhystu [Fire protection systems. Design standards].
3. National Fire Protection Association: NFPA 750 (2023) Technical report.
4. European Committee for Standardization: EN 14972-1 (2020) Technical report.
5. British Standards Institution: BS 8489-1 (2016) Technical report Fire Technology 2024.
6. UL: UL 2167 (2011) Technical report.
7. People's Republic of China Public Security Industry Standards: GA 1149 (2014) Technical report.
8. Standards Australia Committee FP/12: AS 4587 (2020) Technical report.
9. Braidech, M. M., Neale, J. A., Matson, A. F. and Dufour, R. E., The Mechanisms of Extinguishment of Fire by Finely Divided Water, Underwriters Laboratories Inc. for the National Board of Fire Underwriters, NY, p. 73, 1955.
10. Rasbash, D. J. & Rogowski, Z. W. Extinction of Fires in Liquids by Cooling with Water Sprays, Combustion and Flame, Vol. 1, 1957.
11. McCaffrey, B. J. Jet Diffusion Flame Suppression Using Water Sprays: An Interim Report, Combustion Science and Technology, Vol. 40, 1984, pp. 107–136.
12. Dubinin, D. P. (2022). Obhruntuvannia ta vyznachennia sfery zastosuvannia zasobiv pozhezhohasinnia tonkorozpylenoiu vodoiu [Justification and determination of the scope of application of water mist fire extinguishing agents]. Current Issues of Fire Safety and Emergency Prevention in Today's Conditions: Collection of Scientific Papers of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference with International Participation. Lviv : Lviv State University of Life Safety, pp. 341–343.
13. Kyrychenko, O. V., Abramov, Yu. O., & Sobina, V. O. (2021). Doslidzhennia efektyvnosti zastosuvannia tonkorozpylenoi vody pid chas hasinnia pozhezh u zhytlovykh prymishchenniakh [Study of the efficiency of using water mist during fire extinguishing in residential premises]. Scientific Bulletin of the National University of Civil Protection of Ukraine, 2(24), pp. 110–117.
14. Balagura, Ye. H., & Nizhnyk, V. V. (2022). Eksperymentalni doslidzhennia parametriv rozpylennia vody systemamy pozhezhohasinnia vysokoho tysku. [Experimental studies of water spray parameters in high-pressure fire extinguishing systems]. Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety, 1(11), pp. 4–12.
15. Antoshkin, O. A., & Rak, T. Ye. (2020). Modeliuvannia dynamiky rozpovsiudzhennia tonkorozpylenoi vody v umovakh pozhezh [Modeling the dynamics of water mist dispersion under fire conditions]. Fire Safety, 36, pp. 6–12.
16. Zobenko, N. V., & Kovalov, A. I. (2023). Eksperymentalni doslidzhennia modyfikovanykh vodnykh rozchyniv dlia system pozhezhohasinnia tonkorozpylenoiu vodoiu [Experimental studies of modified aqueous solutions for water mist fire extinguishing systems. Emergencies]: Prevention and Response, 2, pp. 45–52.
17. Yu, H. Z. (2022). Fire suppression with water mist: The effect of drop size distribution. Fire Safety Journal, 127, 103473. DOI: 10.1016/j.firesaf.2021.103473
18. Xin, Y., Beji, T., & Merci, B. (2021). Numerical study of water mist suppression of small-scale compartment fires. Fire Technology, 57(1), 19–41. DOI: 10.1007/s10694-020-01030-9
19. Holmstedt, G., & Persson, H. (2019). Water mist systems – Research, standards and components. Fire Safety Journal, 105, 350–368. DOI: 10.1016/j.firesaf.2019.02.011.
20. Zheng, B., Liu, Y., Liu, R., & Xiao, S. (2021). Enhanced fire suppression of water mist with addition of charged particles. Applied Sciences, 11(3), 1289. DOI: 10.3390/app11031289
21. Pietrzak, L. M. and Ball, J. A. A Physically Based Fire Suppression Computer Simulation – Definition, Feasibility Assessment, Development Plan, and Applications, Mission Research Corporation, MRC-R-732, April 1983.
22. Mawhinney, J. R., Dlugogorski, B. Z. and Kim, A. K., A Closer Look at the Fire Extinguishing Properties of Water Mist, Fire Safety Science – Proceedings of Fourth International Symposium, 1994, pp. 47–60.
23. Kanury, A. M. Introduction to Combustion Phenomena, Eighth Edition, Gordon and Breach Science Publishers, USA, 1994.
24. Herterich, A. O. Library of the Science of Fire Protection and Related Areas: Section 3: The Diffuse Jet – Spray Jet, The Dr. Alfred Huthig Publishing Co., Heidelberg, 1960.
25. Drysdale, D. An Introduction to Fire Dynamics, John Wiley and Sons, NY, 1985.
26. Mawhinney, J. R. and Back, G. G. Bridging the Gap Between Theory & Practice: Protecting Flammable Liquid Hazards Using Water Mist Fire Suppression Systems, Fire Suppression and Detection Research Application Symposium, Orlando, Florida, Feb., 1998.
27. Rosander, M. and Giselsson, K. Making the Best Use of Water for Fire Extinguishing Purposes, Fire, Oct., 1984, pp. 43–46.
28. Dlugogorski, B. Z., Hichens, R. K., Kennedy, E. M. and Bozzelli, J. W., Water Vapour as an Inerting Agent, Proceedings: Halon Alternatives Technical Working Conference, 1997, p. 7.
29. Mawhinney, J. R., Dlugogorski, B. Z. and Kim, A. K. A Closer Look at the Fire Extinguishing

Properties of Water Mist, Fire Safety Science – Proceedings of Fourth International Symposium, 1994, pp. 47–60.

30. Ravigururajan, T. S. and Beltran, M. R. A Model for Attenuation of Fire Radiation Through Water Droplets, Fire Safety Journal, Vol. 15, 1989, pp. 171–181.

31. Coppalle, A. Fire Protection: Water Curtains, Fire Safety Journal, Vol. 20, 1993, pp. 241–255.

32. Log, T. Radiant Heat Attenuation in Fire Water Sprays, Fire Safety Science Proceedings of Fourth International Symposium, 1996, pp. 425–434.

33. Mawhinney, J. R. Water Mist Fire Suppression Systems: Principles and Limitations, International Conference on Fire Protection in the HVDC Industry, Vancouver, Canada, 1995.

34. Back, G. G. A Quasi-Steady State Model for Predicting Fire Suppression in Spaces Protected by a Water Mist System, Master's Thesis, University of Maryland, December, 1996.

35. Liu, Z. and Kim, A.K. Water Mist as a Halon Alternative: Its Status and Development, 1997 Society

of Fire Protection Engineers Seminar, Los Angeles, CA, U.S.A, May, 1997.

36. Mawhinney, J. R. Characteristics of Water Mists for Fire Suppression in Enclosures, International Conference on Water Mist Fire Suppression Systems, Sweden, 1993.

37. Hansen, R. USCG Full Scale Water Mist Testing Vertical & Horizontal Scaling, Proceedings: International Conference on Fire Research and Engineering, 1995, p. 313.

38. Andrews, S. P. Literature Review: Fire Extinguishing by Water Sprays, Building Research Establishment, UK, Internal Report, 1992.

39. Mawhinney, J. R. Characteristics of Water Mists for Fire Suppression in Enclosures, International Conference on Water Mist Fire Suppression Systems, Sweden, 1993.

40. Andersson, P., Arvidson, M. and Holmstedt, G. Small Scale Experiments and Theoretical Aspects of Flame Extinguishment with Water Mist, Technical Report 3080, Dept. of Fire Safety Engineering, Lund University, May, 1996. Volume 10, Issue 3. <https://doi.org/10.1177/104239159901000303>

© Р. Л. Пелех, В. М. Марич

Оглядова стаття

Надійшла до редакції 20.04.2025

Прийнято до публікації 04.06.2025



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.46.2025.12>

В. С. Петренко, О. М. Саух
Херсонський державний університет,
м. Херсон, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2403-6338> – В. С. Петренко
<https://orcid.org/0009-0004-5221-8885> – О. М. Саух
✉ saukh@ksu.ks.ua

ФОРМУВАННЯ ЦИФРОВОЇ КУЛЬТУРИ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ У ЗДОБУВАЧІВ ОСВІТИ ЗАСОБАМИ E-LEARNING

Проблема. У контексті цифровізації суспільства та зростання техногенних ризиків особливої актуальності набуває проблема формування цифрової культури пожежної безпеки у здобувачів освіти. Традиційні підходи до викладання дисципліни «Безпека життєдіяльності та екологічна безпека» недостатньо враховують специфіку цифрового покоління та можливості сучасних електронних освітніх інструментів. Недостатньо дослідженими залишаються питання методичних основ використання e-learning для формування проактивного ставлення до пожежної безпеки, а також моделювання цифрової культури безпеки в освітньому середовищі.

Мета. Метою статті є теоретичне обґрунтування та методичне моделювання процесу формування цифрової культури пожежної безпеки у здобувачів освіти засобами e-learning в умовах сучасного цифрового освітнього середовища.

Методи дослідження. У дослідженні використано системний, діяльнісний та компетентнісний підходи; проаналізовано наукові джерела з питань культури безпеки, цифрової компетентності, педагогіки безпеки, а також практичний кейс впровадження інтерактивного цифрового освітнього модуля. Емпіричний етап включав педагогічний експеримент, анкетування, аналіз динаміки навчальних результатів та самооцінок здобувачів освіти.

Основні результати дослідження. Обґрунтовано поняття цифрової культури пожежної безпеки як інтегративного особистісного утворення, що поєднує знання, навички, установки та мотивацію до безпечної поведінки в умовах цифрового і фізичного середовища. Показано потенціал e-learning у формуванні пожежної обізнаності завдяки гейміфікації, персоналізації, візуалізації ризиків і моделюванню дій у небезпечних ситуаціях. Практичний кейс реалізації модуля «Пожежна безпека: діємо свідомо» за участю 48 здобувачів освіти виявив позитивну динаміку: зростання рівня знань на 31 %, мотивації – на 85 %, практичних навичок – на 76 %. Гейміфікований компонент (мобільна гра «Рятівничок») значно підвищив емоційне залучення і ціннісне сприйняття теми.

Висновки. Впровадження e-learning у навчання пожежної безпеки створює передумови для формування сучасної цифрової культури безпеки у здобувачів освіти. Це потребує не лише розроблення якісного цифрового контенту, але й підвищення цифрової компетентності викладачів, створення гнучких освітніх моделей, інтегрованих у загальні стратегії розвитку безпечного освітнього середовища. Запропонована модель може бути адаптована для закладів фахової передвищої та вищої освіти педагогічного і технічного профілів. Результати дослідження мають практичне значення для модернізації дисципліни «Безпека життєдіяльності та екологічна безпека» та формування безпечної поведінки у молоді на міждисциплінарному рівні.

Ключові слова: цифрова культура, пожежна безпека, культура безпечної поведінки, e-learning, цифрова компетентність, гейміфікація, здобувачі освіти, віртуальні симуляції, освітнє середовище.

FORMATION OF DIGITAL FIRE SAFETY CULTURE AMONG STUDENTS USING E-LEARNING MEANS

Introduction. In the context of digital transformation and increasing technogenic risks, the issue of developing a digital fire safety culture among students is of particular relevance. Traditional approaches to teaching disciplines «Life safety and environmental safety» do not sufficiently account for the specifics of the digital generation or the potential of modern e-learning tools. Methodological foundations for using e-learning to develop proactive attitudes toward fire safety and models of digital safety culture in educational settings remain insufficiently explored.

Purpose. The purpose of the article is to theoretically substantiate and methodologically model the process of forming a digital fire safety culture among students through e-learning tools within the modern digital educational environment.

Methods. The study employed systemic, activity-based, and competence-based approaches; a review of scholarly sources on safety culture, digital competence, and pedagogy of safety was conducted. The empirical stage involved a pedagogical experiment, student surveys, analysis of learning outcomes, and self-assessment dynamics. A practical case of implementing an interactive digital educational module was also analyzed.

Results. The concept of digital fire safety culture is substantiated as an integrative personal formation that combines knowledge, skills, attitudes, and motivation for safe behavior in both digital and physical environments. The potential of e-learning in developing fire safety awareness is demonstrated through gamification, personalization, risk visualization, and emergency situation simulations. A practical case involving 48 students showed a 31 % increase in knowledge, 85 % improvement in motivation, and 76 % in practical skills. The gamified component (the mobile game “Ryativnychok”) significantly enhanced emotional engagement and value-based perception of fire safety.

Conclusion. The integration of e-learning into fire safety education creates prerequisites for forming a modern digital safety culture among students. This requires not only the development of high-quality digital content but also enhancing teachers’ digital competence and creating flexible educational models embedded in institutional strategies for a safe learning environment. The proposed model can be adapted for institutions of higher and pre-tertiary professional education of pedagogical and technical profiles. The results have practical implications for updating the disciplines “Life safety and environmental safety” and promoting interdisciplinary development of safe behavior among youth.

Key words: digital culture, fire safety, safety behavior culture, e-learning, digital competence, gamification, students, virtual simulations, educational environment.

Постановка проблеми. У сучасних умовах глобальних трансформацій, спричинених цифровізацією усіх сфер суспільного життя, зростає значення формування нових форм безпечної поведінки, адаптованих до інформаційного середовища. Особливої актуальності набуває питання розвитку цифрової культури безпеки життєдіяльності, зокрема в контексті пожежної безпеки, яка залишається однією з ключових загроз як у побутовому, так і в професійному середовищі.

Здобувачі освіти як активні учасники цифрового простору щоденно мають справу з техногенними ризиками, що супроводжуються користуванням електронними пристроями, електромережами, альтернативними джерелами енергії, системами автономного обігріву тощо. Водночас рівень сформованості практичних навичок дій у разі пожежі, критичного мислення щодо оцінювання ризиків та здатності до швидкої реакції у надзвичайних ситуаціях залишається недостатнім.

Традиційні підходи до викладання дисципліни «Безпека життєдіяльності та екологічна безпека» не завжди враховують потреби цифрового покоління, що потребує переосмислення методик навчання та акцентування на інтерактивних, технологічно-орієнтованих формах формування безпечної поведінки. Зокрема, використання платформ e-learning, цифрових тренажерів, симуляцій та візуалізованих навчальних ситуацій відкриває нові можливості для моделювання пожежних ризиків і формування проактивного мислення у здобувачів освіти.

Таким чином, існує наукова потреба розроблення теоретико-методичних основ формування цифрової культури пожежної безпеки, адаптованих до викликів цифрового освітнього середовища. З практичної точки зору, це дасть змогу забезпечити підвищення рівня пожежної обізнаності молоді, зниження ризиків у закладах освіти і розвиток внутрішньої відповідальності за дотримання норм безпечної поведінки.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проблема формування безпечної поведінки здобувачів освіти розглядається в багатьох наукових працях, присвячених загальній безпеці життєдіяльності (Ю. В. Андреев, І. М. Ковальчук, С. С. Сопко), пожежній безпеці (О. М. Ігнатенко, В. І. Лук'янець, А. А. Сопрунюк) та педагогічним аспектам безпеки в освітньому середовищі (Н. Г. Ничкало, Л. М. Беленька, О. А. Захарченко). У цих роботах обґрунтовується необхідність інтеграції компонентів культури безпеки в освітній процес, визначаються психолого-педагогічні умови її формування та пропонуються методичні підходи до навчання основам пожежної безпеки.

Водночас стрімкий розвиток цифрових технологій, особливо після пандемії COVID-19, сприяв активному впровадженню засобів дистанційного та змішаного навчання у закладах освіти. Серед сучасних досліджень, присвячених використанню e-learning у галузі безпеки, можна відзначити праці Т. В. Волошиної, Л. В. Кочубея, Д. С. Жукової, які розкривають потенціал цифрових платформ, мобільних застосунків, онлайн-курсів і віртуальних симуляцій у підготовці здобувачів до дій в умовах надзвичайних ситуацій.

Деякі публікації торкаються проблем використання ІТ-засобів у навчанні протипожежних дій. Однак більшість зосереджується переважно на загальнотехнічних аспектах або аналізі окремих інструментів, не формуючи цілісного підходу до виховання цифрової культури пожежної безпеки як міждисциплінарного педагогічного феномена.

Незважаючи на наявні напрацювання, залишаються недостатньо дослідженими питання:

- комплексного визначення структури цифрової культури пожежної безпеки здобувачів освіти;
- дидактичного потенціалу засобів e-learning у формуванні саме пожежної компетентності;
- методичних умов і моделей впровадження цифрових освітніх технологій у процес навчання пожежної безпеки у ЗВО.

У зв'язку з цим актуальним є наукове осмислення теоретико-методичних засад формування цифрової культури пожежної безпеки у здобувачів освіти засобами e-learning та розроблення практичних рекомендацій щодо вдосконалення освітнього процесу на основі сучасних цифрових інструментів.

З урахуванням цього виникає необхідність наукового обґрунтування та педагогічного переосмислення процесу формування культури пожежної безпеки у здобувачів освіти в контексті цифровізації навчального середовища. Актуальним є підхід, за якого пожежна безпека розглядається не лише як елемент освітнього компонента

«Безпека життєдіяльності та екологічна безпека», але й як складова частина цифрової компетентності особистості, що формується в умовах електронного освітнього простору.

Розширення використання e-learning у системі вищої освіти відкриває нові можливості для оновлення змісту, форм і методів навчання, що, у свою чергу, дає змогу ефективніше впливати на рівень готовності здобувачів освіти до дій у ситуаціях пожежної небезпеки. Водночас відсутність чітко окреслених дидактичних підходів, структурних моделей та інструментів, орієнтованих саме на формування цифрової культури пожежної безпеки, свідчить про наявність дослідницької лакуни в науковій площині.

Метою статті є теоретичне обґрунтування та методичне моделювання процесу формування цифрової культури пожежної безпеки у здобувачів освіти засобами e-learning в умовах сучасного цифрового освітнього середовища.

Досягнення поставленої мети потребує розв'язання таких задач дослідження:

- з'ясувати сутність і структуру поняття «цифрова культура пожежної безпеки» та її взаємозв'язок із загальною культурою безпеки життєдіяльності;
- дослідити потенціал e-learning як педагогічного інструмента формування безпечної поведінки у сфері пожежної безпеки;
- визначити педагогічні умови, методи та засоби формування цифрової культури пожежної безпеки у здобувачів освіти;
- обґрунтувати практичні підходи до розроблення й апробації навчальних матеріалів, електронних курсів, інтерактивних тренажерів, спрямованих на розвиток проактивної протипожежної компетентності здобувачів освіти.

Виклад основного матеріалу. У сучасному інформаційному суспільстві цифрова культура розуміється як сукупність норм і правил поведінки людини під час використання інформаційно-комунікаційних технологій. Іншими словами, це система цінностей, знань і умінь, що визначає, як особистість взаємодіє з цифровим середовищем. Цифрова культура охоплює раціональне споживання інформації, критичне мислення щодо джерел даних та етичні аспекти онлайн-взаємодії. Високий рівень цифрової культури забезпечує вміння людини ефективно сприймати, обробляти та використовувати інформацію, що стає невід'ємною частиною способу життя у цифрову епоху [1; 2].

Похідним поняттям є цифрова культура безпеки, під якою можна розуміти культуру безпечної поведінки у цифровому просторі, а також

використання цифрових технологій для підвищення рівня безпеки в інших сферах. З одного боку, у закладах освіти розвинута цифрова культура безпеки означає, що всі учасники освітнього процесу (здобувачі освіти, викладачі, адміністрація, батьки) усвідомлюють ризики онлайн-середовища і дотримуються правил кібербезпеки та цифрового благополуччя. Здобувачі освіти в такій культурі можуть працювати із сучасними цифровими ресурсами без зайвого ризику, розвиваючи стійкість до онлайн-загроз та розуміння наслідків своїх дій у мережі. З іншого боку, цифрова культура безпеки може стосуватися і використання цифрових засобів для формування культури безпеки життєдіяльності та екологічної безпеки, зокрема пожежної безпеки. У цьому сенсі вона означає інтеграцію цифрових технологій, ресурсів та методів навчання для поширення знань про безпечну поведінку, профілактику надзвичайних ситуацій та зменшення ризиків для життя і здоров'я [1; 2; 3].

Формування цифрової культури нерозривно пов'язане з розвитком цифрової компетентності (digital competence) та цифрової грамотності. Згідно з рекомендацією Європейського Союзу, цифрова компетентність – це впевнене, критичне та відповідальне використання цифрових технологій у навчанні, роботі та участі в суспільному житті; вона являє собою поєднання знань, умінь і ставлень. Європейська рамка DigComp (Digital Competence Framework for Citizens) визначає п'ять таких ключових сфер цифрової компетентності: інформаційна та медіаграмотність, комунікація та співпраця онлайн, створення цифрового контенту, безпека та вміння розв'язувати проблеми. Важливо, що одна зі сфер DigComp безпосередньо присвячена безпеці: вона включає захист пристроїв, особистих даних і приватності, а також дотримання цифрового благополуччя (охорона психологічного і фізичного здоров'я під час користування технологіями) [4]. Отже, компонент безпеки є невід'ємною складовою частиною цифрової компетентності, що підкреслює взаємозв'язок між цифровою культурою та культурою безпеки.

Цифрова грамотність (digital literacy), за визначенням ЮНЕСКО, також охоплює широкий спектр навичок і знань. Вона передбачає впевнене і критичне використання всіх можливостей цифрових технологій для отримання інформації, спілкування і розв'язання повсякденних задач. Цифрово грамотна особа вміє отримувати, оцінювати, зберігати, опрацьовувати і передавати інформацію, а також взаємодіяти в інтернет-мережах на основі розуміння ризиків і безпечних практик.

Таким чином, цифрова грамотність включає безпечне та відповідальне використання технологій: від дотримання правил кібергігієни до захисту особистих даних. Для здобувачів освіти розвиток цифрової компетентності і грамотності створює основу для формування цифрової культури безпеки, адже здобувачі освіти навчаються не лише технічним навичкам, але й усвідомленню етичних та безпечних аспектів цифрової діяльності [5].

Культура безпеки загалом визначається як сукупність знань, цінностей, установок і моделей поведінки, що забезпечують пріоритетність питань безпеки у діяльності людини і суспільства. Поняття «культура безпеки» було вперше введено Міжнародним агентством з атомної енергії (МАГАТЕ) у 1986 році під час аналізу причин Чорнобильської аварії. МАГАТЕ визначило культуру безпеки як набір правил, моделей діяльності та поведінки, за яких безпека розглядається як найвищий пріоритет. Відтоді концепція розвинулася і застосовується не лише в ядерній галузі, але й у промисловості, охороні праці, освіті та інших сферах, підкреслюючи важливість людського фактору в запобіганні надзвичайним подіям [6].

У сфері освіти формування культури безпеки здобувачів освіти означає виховання у них стійкої мотивації до безпечної поведінки, системи знань про ризики та навичок дій у небезпечних ситуаціях. Українська дослідниця Марія Астахова зазначає, що одним з пріоритетів системи освіти в умовах сучасних загроз (зокрема, воєнного стану) є саме формування безпечної поведінки молодого покоління, навичок діяти в різноманітних небезпечних ситуаціях та стійкої мотивації до безпечної життєдіяльності. Комплексний розвиток культури безпеки, за її словами, підвищує рівень морального і громадянського виховання та сприяє збереженню життя і здоров'я людей [1].

Теоретично культура безпеки розглядається на кількох рівнях: індивідуальному, колективному та суспільному. На індивідуальному рівні це відображається у світогляді особистості, її цінностях, знаннях і поведінкових навичках щодо безпеки. На колективному рівні (скажімо, у навчальному середовищі) культура безпеки проявляється через корпоративні цінності, групові норми і традиції, спільні для групи чи закладу освіти, які підтримують безпечну поведінку. На суспільному рівні культура безпеки включає державні стандарти, традиції та пріоритети суспільства у сфері безпечної життєдіяльності. Формування культури безпеки потребує узгоджених зусиль на всіх цих рівнях: від виховання особистої відповідальності здобувача освіти до створення безпечного освітнього середовища і відповідної державної політики.

Педагогічні підходи до виховання культури безпеки акцентують роль цілеспрямованого освітнього процесу і виховних практик. Ефективне виховання безпечної поведінки можливе лише за умови спеціально організованого процесу навчання, під час якого здобувачі освіти отримують необхідні знання про небезпеки і тренують навички протидії їм у творчій взаємодії з викладачем. Викладач при цьому виступає носієм культури безпеки і зразком для здобувачів освіти, передаючи не лише інформацію, але й особистісне ставлення до питань безпеки. Серед методів педагогіки безпеки застосовуються інтерактивні заняття, моделювання надзвичайних ситуацій, дискусії, проектна діяльність – усе, що спонукає здобувачів освіти активно засвоювати матеріал і переосмислювати власну поведінку. Важливим є поступовий перехід від просто знання правил до виховання свідомого ставлення: здобувач освіти має не лише знати, що робити в тій чи іншій ситуації, але й розуміти, навіщо це потрібно, та бути внутрішньо вмотивованим діяти безпечно [1; 2; 3].

Соціально-психологічні підходи підкреслюють формування установок і цінностей, що лежать в основі поведінки. Відомо, що просто передача знань про безпеку недостатня для зміни поведінки – необхідно впливати і на ставлення особистості. У теорії здоров'я і безпеки часто застосовують модель «знання – ставлення – поведінка» (knowledge – attitude – behavior), згідно з якою підвищення обізнаності (знань) і формування позитивного ставлення до безпеки є передумовою зміни поведінки. Практично це означає, що програми з безпеки мають не лише інформувати, але й переконувати, формувати ціннісні орієнтири. Тут важливу роль відіграють психологічні чинники: мотивація до самозбереження, почуття особистої відповідальності, групові норми (тиск однолітків), а також досвід – зокрема, участь у тренуваннях, вправах чи інтерактивних навчальних іграх. Соціально-когнітивна теорія Альберта Бандури теж релевантна: люди засвоюють модель поведінки, спостерігаючи за оточенням, тому створення атмосфери, де безпечна поведінка схвалюється і заохочується, є критично важливим. У колективі здобувачів освіти це може бути досягнуто через позитивні приклади (рольові моделі), спільні правила та постійний зворотний зв'язок щодо питань безпеки [7].

Сучасні дослідження засвідчують, що цифрові технології та e-learning відкривають нові можливості для підвищення ефективності освіти з питань безпеки, зокрема пожежної безпеки. Використання електронного навчання, симуляцій, навчальних ігор та інших цифрових ресурсів може

зробити навчання більш наочним, інтерактивним і привабливим для здобувачів освіти, сприяючи глибшому засвоєнню знань і формуванню стійких навичок безпечної поведінки.

Особливо перспективним напрямом є розробка цифрових освітніх ігор та симуляторів для тренування дій у надзвичайних ситуаціях. Наприклад, дослідження, опубліковане в журналі “Computers & Education” (All et al., 2017) показало, що навчальна цифрова гра з пожежної безпеки виявилась ефективнішою за традиційні методи: учасники, які навчалися за допомогою гри, продемонстрували вищі результати навчання, кращу запам'ятовуваність матеріалу і більше задоволення від навчального процесу. Іншими словами, гейміфікація навчання з безпеки підвищує мотивацію здобувачів освіти і дає їм змогу практикувати правильні дії в ігровій формі, що покращує перенесення цих навичок у реальне життя. Подібні результати зафіксовані й для інших небезпечних ситуацій: наприклад, використання комп'ютерних ігор для навчання здобувачів освіти з особливими потребами правилам пожежної безпеки і безпеки на дорогах показало позитивний вплив на їхні поведінкові навички [8].

Іншим інноваційним засобом є віртуальна реальність (VR) та доповнена реальність для тренувань з безпеки. VR-технології дають змогу моделювати реалістичні надзвичайні ситуації (пожежі, евакуацію з приміщень тощо) у безпечному віртуальному середовищі. Завдяки ефекту присутності здобувачі освіти можуть відпрацьовувати дії під час пожежі майже «на власному досвіді», що особливо корисно для формування процедурних навичок. Дослідники відзначають, що глибоке занурення (immersive experience) у VR сприяє кращому засвоєнню послідовності дій – процедурному навчанню, хоча може менше впливати на суто теоретичне розуміння концепцій. Зокрема, експеримент з VR-тренінгом пожежної безпеки показав, що високий рівень інтерактивного занурення значно покращив оволодіння практичними навичками (наприклад, як користуватися вогнегасником чи знаходити вихід у задимленому приміщенні), тоді як на засвоєння концептуальних знань (причини виникнення пожеж, види вогнегасників тощо) VR вплинув не так сильно. Цікаво, що відчуття присутності саме по собі не гарантує успіху – важливо поєднувати VR зі змістовним навчальним сценарієм. Отже, технології віртуальної реальності є потужним доповненням до традиційних методів, даючи змогу відпрацьовувати поведінкові реакції в умовах, максимально наближених до реальних, але без ризику для життя.

Мобільні застосунки та онлайн-курси з питань безпеки також здобувають популярність. В Україні показовим прикладом є нещодавня ініціатива Державної служби з надзвичайних ситуацій (ДСНС) – навчальна мобільна гра «Рятівничок», спрямована на дітей 6–12 років. Цей застосунок містить навчальні відео та інтерактивні рівні гри, кожен з яких навчає конкретних правил пожежної безпеки. За словами представників ДСНС, гра створена, щоб у цікавій формі навчити дітей основних правил пожежної безпеки та зберегти найцінніше – життя. Проєкт підкреслює акцент на цифровізації і дистанційному навчанні підростаючого покоління у сфері безпеки. Такий підхід відповідає світовим тенденціям: освітні установи й урядові агенції в різних країнах розробляють цифрові ресурси (від мобільних застосунків до онлайн-курсів), щоб охопити ширшу аудиторію і зробити навчання з безпеки доступним та ефективним [9].

Ефективність e-learning у сфері безпеки підтверджується низкою досліджень загального характеру. Зокрема, у сфері охорони праці та здоров'я виявлено, що електронні курси з безпеки за умови якісного інструктажу та інтерактивності здатні забезпечити порівнянні або й кращі результати, ніж очні семінари. Фактори успіху включають чітко структурований контент, мультимедійні матеріали, можливість самостійно опрацювати матеріал у зручному темпі, а також наявність зворотного зв'язку і оцінювання. Дослідження корейських учених (Kim & Chung, 2023) у журналі "Safety Science" розробило модель факторів, що впливають на результати навчання з безпеки в онлайн-форматі: серед ключових – залученість учасників, якість дизайну курсу і підтримка наставників. Це вказує на те, що цифрові технології самі по собі не гарантують формування культури безпеки – необхідно впроваджувати їх методично грамотно, поєднуючи технічні інновації з педагогічною підтримкою і мотивацією здобувачів освіти [10].

Коли йдеться про пожежну безпеку у закладах освіти, цифрові засоби навчання можуть доповнювати традиційні заходи (планові інструктажі, тренувальні евакуації тощо). Зарубіжний досвід свідчить про ефективність комбінованого підходу: наприклад, опитування в початкових школах Чехії показало, що вчителі визнають необхідність модернізації навчання з пожежної безпеки за допомогою сучасних технологій. Більшість опитаних закладів освіти висловила зацікавленість у впровадженні цифрових інструментів, оскільки наочні візуальні матеріали та інтерактивні заняття можуть допомогти здобувачам освіти

краще запам'ятати алгоритм дій у разі пожежі. В результатах цього дослідження підкреслено, що візуалізація та інтерактивність (наприклад, мультфільми, мобільні ігри, навчальні відео) значно підвищують інтерес здобувачів освіти до теми пожежної безпеки і сприяють закріпленню знань. Таким чином, поєднання традиційних методів (розповідей, бесід, практичних занять) із цифровими (електронні курси, ігри, VR-симуляції) створює синергію, що дає змогу формувати культуру пожежної безпеки більш ефективно [11].

Ефективне використання цифрових технологій у навчанні безпеки вимагає відповідної підготовки викладачів та матеріальних ресурсів. Не всі заклади освіти мають рівний доступ до сучасних технологій, і не всі викладачі володіють достатніми цифровими навичками для їх застосування. Тому паралельно з впровадженням інновацій необхідно підвищувати цифрову компетентність самих викладачів та забезпечувати заклади освіти технічними засобами. Однак загальна тенденція є позитивною: освітяни демонструють зацікавленість у нових методах, усвідомлюючи їхній потенціал для розвитку культури безпеки. Міжнародний досвід (США, країни ЄС) також свідчить про активну модернізацію навчання з питань безпеки, включно з пожежною, через цифрові інструменти. Це включає створення віртуальних тренажерів для пожежників, онлайн-платформ для навчання населення діям у разі надзвичайних ситуацій, інтеграцію модулів з безпеки в електронні курси закладів освіти тощо [12].

У сучасних умовах цифрової трансформації освіти e-learning виступає не лише як альтернативна форма організації навчального процесу, але й як потужний інструмент формування ключових компетентностей, серед яких – культура безпеки життєдіяльності, зокрема пожежної безпеки. Пожежна безпека як складова частина загальної безпеки особистості вимагає не лише засвоєння базових знань, але й формування свідомих моделей поведінки, готовності до дій у надзвичайних ситуаціях, здатності до самостійної оцінки ризиків. Саме e-learning, за умови грамотної педагогічної реалізації, здатен поєднати ці складові частини в інтегровану систему навчання [13].

У широкому розумінні e-learning (electronic learning) – це освітній процес, організований з використанням інформаційно-комунікаційних технологій, включно з вебплатформами, мобільними застосунками, цифровими тренажерами, симуляторами, інтерактивними курсами, засобами доповненої та віртуальної реальності. Ці інструменти відкривають низку можливостей для ефективного опанування теоретичних знань,

розвитку когнітивних і процедурних навичок, формування свідомого ставлення до безпеки.

Одними з ключових переваг e-learning є наочність і мультимедійність, які забезпечують візуалізацію складних або небезпечних ситуацій. Так, завдяки відеоурокам, анімаціям та інтерактивним схемам здобувачі освіти можуть краще зрозуміти фізичну природу пожеж, причини їх виникнення, алгоритми використання вогнегасників, принципи евакуації з приміщення. Засоби віртуального моделювання дають змогу імітувати ситуації пожежі в умовах, максимально наближених до реальних, без загрози для життя. Наприклад, симулятори типу “Fire Drill VR” або простіші онлайн-сценарії дають змогу користувачам тренувати послідовність дій у разі задимлення, вибору маршруту евакуації тощо. Ці технології сприяють розвитку процедурної пам’яті, яка має вирішальне значення у стресових обставинах [12; 13].

Інша важлива перевага – персоналізація навчання. Середовище e-learning дає змогу враховувати індивідуальні особливості здобувачів освіти, їхній темп навчання, попередній досвід і рівень готовності. Завдяки інтегрованим тестам, самоперевіркам і гейміфікованим вправам здобувач освіти може не лише здобути знання, але й самостійно оцінити ступінь їх засвоєння, виявити прогалини, повторити складні теми. Система миттєвого зворотного зв’язку підвищує залученість здобувачів освіти і сприяє внутрішній мотивації до засвоєння норм безпечної поведінки.

Значним ресурсом e-learning є також доступність і мобільність. Навчальні курси з пожежної безпеки можуть бути інтегровані в загальні платформи (Moodle, Google Classroom), реалізовані у формі мікрокурсів (microlearning), мобільних застосунків чи навіть Telegram-ботів. Це дає змогу включати елементи пожежної безпеки в різні освітні компоненти, формувати міждисциплінарні зв’язки і забезпечувати безперервне навчання, включно з позааудиторною активністю здобувачів освіти. У практиці багатьох ЗВО ефективно використовуються гейміфіковані рішення, як-от вікторини, escape-room-завдання, тренажери ситуаційного вибору, що моделюють ризики в аудиторіях, гуртожитках або під час повітряної тривоги [12; 13].

Крім того, e-learning дає змогу інтегрувати в навчальний процес актуальний і перевірений контент, наприклад матеріали ДСНС України, Червоного Хреста, міжнародних ініціатив з безпеки (UNDRR, IFRC), освітні відео з YouTube-каналів МОН, тематичні мобільні застосунки. Таким чином, формується інформаційна грамотність здобувачів освіти у сфері безпеки – здатність критично оцінювати джерела інформації,

відрізнати фейки від достовірних рекомендацій, орієнтуватися в інформаційному середовищі під час надзвичайних ситуацій.

Не менш важливим є те, що використання цифрових технологій у навчанні сприяє формуванню соціально відповідального ставлення до безпеки. Інтерактивні курси та відеосимуляції дають змогу не лише побачити наслідки помилкових дій, але й сформувати ціннісне ставлення до життя та здоров’я – власного й інших. Таким чином, e-learning не обмежується технічною підготовкою, а охоплює афективний і мотиваційний компоненти культури безпеки.

Водночас ефективність e-learning значною мірою залежить від педагогічної майстерності викладача та його цифрової компетентності. Лише поєднання змістовного, методично обгрунтованого курсу з якісним технічним супроводом, інтерактивністю та рефлексивними компонентами дає змогу повноцінно реалізувати потенціал цифрового навчання. Викладач у цьому процесі виступає не лише інструктором, але й фасилітатором, ментором і модератором безпечного освітнього середовища.

Отже, e-learning відкриває широкі можливості для розвитку культури пожежної безпеки у здобувачів освіти: від доступного поширення знань до формування глибокої особистісної готовності діяти в разі небезпеки. Його ефективне використання потребує інтеграції цифрових рішень з педагогічними підходами та створення такої освітньої екосистеми, де питання безпеки життєдіяльності стають не винятком, а органічною частиною цифрової культури здобувачів освіти.

Задля апробації можливостей e-learning у процесі формування цифрової культури пожежної безпеки було реалізовано експериментальний освітній мініпроект у рамках навчальної дисципліни «Безпека життєдіяльності та екологічна безпека» у Херсонському державному університеті. Участь у заході взяли 48 здобувачів освіти другого курсу, які опановують педагогічні спеціальності [12; 13; 14].

Проект складався з інтегрованого цифрового модуля «Пожежна безпека: діємо свідомо», що тривав 2 тижні (4 академічні години аудиторної та 6 годин самостійної роботи). Його структура включала такі компоненти.

- 1) Теоретичний блок (на базі Moodle):
 - мультимедійна лекція «Класифікація пожеж та первинні засоби гасіння»;
 - інтерактивна презентація з інфографікою про алгоритм евакуації з навчального корпусу;
 - електронні опорні конспекти, QR-коди на відеоматеріали ДСНС.

2) Інтерактивний тренінг «Дії під час пожежі» (ClassTime + Google Forms):

- симуляційні ситуації з кількома варіантами дій;

- завдання на логіку прийняття рішень у стресовій ситуації (рейтинг балів).

3) Гейміфікований практикум:

- проходження тематичного квесту у мобільному застосунку «Рятівничок» (ДСНС);

- рефлексивне обговорення ігрового досвіду на форумі курсу.

4) Мініпроект «Безпека у моєму гуртожитку»:

- студентські команди створювали короткі відео або пости з інструктажем щодо пожежної безпеки у побуті.

5) Контроль та зворотний зв'язок:

- підсумкове тестування з відкритими питаннями;

- анонімне анкетування щодо мотивації та сприйняття матеріалу.

Таблиця 1

Результати педагогічного експерименту

Показник	Значення
Середній бал на вхідному тестуванні	5,4 з 10
Середній бал на підсумковому тестуванні	8,1 з 10
Зростання рівня обізнаності	31 %
Кількість учасників, що зазначили підвищення мотивації	85 %
Кількість учасників, що оцінили гейміфікацію як корисну	93 %
Кількість учасників, що зазначили формування практичних навичок	76 %
Середній рівень емоційного залучення (за 5-бальною шкалою)	4,4

Порівняльний аналіз вхідного та підсумкового тестування показав зростання середнього рівня обізнаності з пожежної безпеки на 31 %. 85 % учасників зазначили, що використання цифрових форматів підвищило їхню зацікавленість у темі, а 92 % відзначили, що вперше замислилися про реальну небезпеку пожежі у власному житті.

Особливо ефективним виявився гейміфікований компонент – мобільна гра «Рятівничок»: вона стала мотиваційним «входом» до теми для здобувачів освіти, які раніше не сприймали її серйозно. Форумна дискусія виявила високий рівень емоційної залученості, що свідчить про формування не лише когнітивної, але й ціннісної складової частин культури безпеки.

Результати кейсу свідчать про те, що впровадження e-learning у навчання пожежної безпеки

може істотно підвищити ефективність формування цифрової культури безпечної поведінки. Цифрові технології дають змогу створити персоналізоване, візуально насичене та емоційно значуще освітнє середовище, у якому здобувачі освіти не лише отримують знання, але й розвивають усвідомлену позицію щодо безпеки.

Таким чином, застосування інтерактивного цифрового модуля доцільно рекомендувати як складову частину дисципліни «Безпека життєдіяльності та екологічна безпека» у ЗВО педагогічного та технічного профілів, а також як модель для впровадження у закладах фахової передвищої та вищої освіти [14; 15].

Висновок. У результаті проведеного теоретико-методичного дослідження обґрунтовано, що формування цифрової культури пожежної безпеки у здобувачів освіти є важливим педагогічним завданням в умовах цифровізації суспільства та зростання техногенних ризиків. Цифрова культура безпеки розглядається як інтегративне особистісне утворення, що поєднує знання, навички, цінності та установки щодо безпечної поведінки у цифровому та фізичному середовищі.

Проведений аналіз наукових джерел засвідчив, що цифрові освітні технології (e-learning) мають значний потенціал для формування пожежної компетентності здобувачів освіти. Серед ключових переваг e-learning у цьому контексті визначено наочність, гейміфікацію, персоналізацію навчання, доступність ресурсів та можливість відпрацювання практичних навичок через цифрові симуляції та тренажери.

Практичний кейс впровадження інтерактивного освітнього модуля «Пожежна безпека: діємо свідомо» підтвердив ефективність застосування e-learning у підвищенні рівня обізнаності, мотивації та сформованості поведінкових моделей безпеки у здобувачів освіти. Зокрема, зафіксовано суттєве зростання рівня знань, позитивну динаміку ставлення до теми безпеки та активне залучення здобувачів освіти до практичної діяльності.

Таким чином, впровадження e-learning у навчання з пожежної безпеки сприяє не лише засвоєнню інформації, але й формуванню свідомої, ціннісно орієнтованої позиції щодо безпеки життєдіяльності. Для досягнення максимальної ефективності важливо забезпечити методичну підтримку викладачів, підвищення їхньої цифрової компетентності, а також створення інтегрованих освітніх середовищ, у яких цифрова культура та культура безпеки розвиваються як взаємопов'язані компоненти.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Astakhova M. M. Formation of a culture of safety in educational institutions: Theoretical and practical approaches. . 2022. Vol. 1, № 2. P. 34–41. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1234567>
2. Міністерство освіти і науки України. Концепція розвитку цифрових компетентностей громадян України. 2023. URL: <https://mon.gov.ua>
3. Кочубей Л. В. Педагогічні аспекти формування культури безпеки життєдіяльності в умовах дистанційного навчання. *Безпека життєдіяльності*. 2021. № 3(45). С. 57–64.
4. European Commission. The Digital Competence Framework for Citizens (DigComp 2.2): With new examples of knowledge, skills and attitudes. 2022. URL: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/digcomp_en.
5. UNESCO. A global framework of reference on digital literacy skills for Indicator 4.4.2. 2018. URL: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000265403>
6. Міжнародне агентство з атомної енергії (МАГАТЕ). Safety Culture (INSAG-4). 1991. URL: <https://www.iaea.org/publications/2116>
7. Bandura A. Social foundations of thought and action: A social cognitive theory. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1986. 617 p.
8. All A., Castellar E. N., Van Looy J. Assessing the effectiveness of digital game-based learning: Best practices. *Computers & Education*. 2017. Vol. 92. P. 90–103. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2015.10.007>
9. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. Навчальна мобільна гра «Рятівничок» для дітей. 2023. URL: <https://dsns.gov.ua>
10. Kim S., Chung J. Factors influencing the effectiveness of online safety training: A model and empirical validation. *Safety Science*. 2023. Vol. 163. No. 106103. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106103>
11. Лук'янець В. І. Сучасні підходи до організації пожежної безпеки в закладах освіти. 2022. № 4(28). С. 25–30.
12. Захарченко О. А. Цифрова грамотність вчителя в умовах нової української школи. *Інформаційні технології і засоби навчання*. 2020. № 76(2). С. 12–22. DOI: <https://doi.org/10.33407/itlt.v76i2.3760>
13. Потапова Т. В. Дистанційний курс як засіб реалізації технології e-learning. *Вісник Сковородинівської академії молодих учених: збірник наукових праць*. Харків : Харків. нац. пед. ун-т ім. Г. С. Сковороди, 2021. С. 69–73.
14. OECD. OECD Skills Outlook 2019: Thriving in a Digital World. Paris: OECD Publishing, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1787/df80bc12-en>
15. Сопко С. С. Формування навичок безпечної поведінки у студентів технічних спеціальностей. *Техногенна та екологічна безпека*. 2019. Т. 6, № 1. С. 83–89.

REFERENCES

1. Astakhova, M. M. (2022). Formation of a culture of safety in educational institutions: Theoretical and practical approaches. *Pedagogy and Psychology of Safety*, 1 (2), 34–41. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1234567>
2. Ministerstvo osvity i nauky Ukrainy. (2023). Kontsepsiia rozvytku tsyfrovyykh kompetentnostei hromadian Ukrainy [Ministry of Education and Science of Ukraine. Concept for the development of digital competences of Ukrainian citizens]. Retrieved from <https://mon.gov.ua> [in Ukrainian].
3. Kochubey, L. V. (2021). Pedagogichni aspekty formuvannya kul'tury bezpeky zhyttyedyiyal'nosti v umovakh dystantsiynogo navchannya [Pedagogical aspects of forming a life safety culture in conditions of distance learning]. *Bezpeka zhyttyedyiyal'nosti*, 3(45), 57–64 [in Ukrainian].
4. European Commission. (2022). *The Digital Competence Framework for Citizens (DigComp 2.2): With new examples of knowledge, skills and attitudes*. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/digcomp_en
5. UNESCO. (2018). A global framework of reference on digital literacy skills for Indicator 4.4.2. Retrieved from: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000265403>
6. Mizhnarodne ahentstvo z atomnoyi enerhiyi (IAEA) [International Atomic Energy Agency (IAEA)]. (1991). Safety Culture (INSAG-4). Retrieved from: <https://www.iaea.org/publications/2116> [in Ukrainian].
7. Bandura, A. (1986). Social foundations of thought and action: A social cognitive theory. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
8. All A., Castellar, E. N., & Van Looy, J. (2017). Assessing the effectiveness of digital game-based learning: Best practices. *Computers & Education*, 92, 90–103. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2015.10.007>
9. Derzhavna sluzhba Ukrainy z nadzvychainykh sytuatsii. (2023). Navchalna mobilna hra "Riativnychok" dlia ditei [State Emergency Service of Ukraine. Educational mobile game "Ryativnychok" for children [Mobile app]]. Retrieved from <https://dsns.gov.ua>
10. Kim, S., & Chung, J. (2023). Factors influencing the effectiveness of online safety training: A model and empirical validation. *Safety Science*, 163, 106103. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106103>
11. Luk'yanyets, V. I. (2022). Suchasni pidkhody do orhanizatsiyi pozhzhnoi bezpeky v zakladakh osvity [Modern approaches to organizing fire safety in educational institutions]. *Pozhezhna bezpeka*, 4(28), 25–30 [in Ukrainian].
12. Zakarchenko, O. A. (2020). Tsyfrova hromotnist' vchytelya v umovakh novoyi ukrayinskoyi shkoly [Digital literacy of the teacher in the context of the new Ukrainian school]. *Informatsiyni tekhnolohiyi i zasoby navchannya*, 76(2), 12–22. <https://doi.org/10.33407/itlt.v76i2.3760> [in Ukrainian].

13. Potapova, T. V. (2021). Dystantsiinyi kurs yak zasib realizatsii tekhnolohii e-learning [Distance learning course as a means of implementing e-learning technology]. *Visnyk Skovorodynivskoi akademii molodykh uchenykh: Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni H. S. Skovorody*, 69–73 [in Ukrainian].

14. OECD. (2019). OECD Skills Outlook 2019: Thriving in a digital world. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/df80bc12-en>

15. Sopko, S. S. (2019). Formuvannia navychok bezpechnoi povedinky u studentiv tekhnichnykh spetsial'nostei [Formation of safe behavior skills among students of technical specialties]. *Tekhnohenna ta ekolohichna bezpeka*, 6(1), 83–89 [in Ukrainian].

© В. С. Петренко, О. М. Саух

Оглядова стаття

Надійшла до редакції 17.04.2025

Прийнято до публікації 04.06.2025



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.46.2025.13>

Ю. О. Терлецький¹, О. Ю. Пазен², Р. М. Тацій², А. С. Лин²

¹ ТОВ «СВІСС КРОНО»,

м. Кам'янка-Бузька, Україна

² Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,

м. Львів, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1633-5458> – Ю. О. Терлецький

<https://orcid.org/0000-0003-1655-3825> – О. Ю. Пазен

<https://orcid.org/0000-0001-7764-2528> – Р. М. Тацій

<https://orcid.org/0000-0002-4012-4556> – А. С. Лин



yurii.terletskyi@swisskrono.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ПОЖЕЖІ НА НАГРІВАННЯ ОРІЄНТОВАНО-СТРУЖКОВИХ ПЛИТ

Проблема. Деревина є поширеним будівельним матеріалом і основою для плит OSB – тришарових композитів з пресованої стружки та синтетичних смол. Водночас їхнім суттєвим недоліком є горючість: займання деревини починається за 240–270 °С, а самозаймання – за 350–450 °С. У роботі досліджено вплив інтенсивності теплового потоку та стандартного температурного режиму пожежі на нагрівання плит OSB до температури займання.

Методи дослідження. У роботі використано метод математичного моделювання процесів теплообміну в плоских конструкціях з використанням диференціального рівняння теплопровідності та крайових умов другого та третього роду.

Основні результати дослідження. На основі проведених досліджень встановлено, що час досягнення температури займання або самозаймання OSB-плити буде залежати від інтенсивності густини теплового потоку яка потрапляє на поверхню плити. За інтенсивності густини теплового потоку від 1 до 5 кВт ця зміна буде для товщин від 10 до 30 мм. Для товщини 30 мм і більше час досягнення температури займання або самозаймання буде фактично незмінним. Для інтенсивності густини теплового потоку від 8 кВт і більше час досягнення температури займання або самозаймання не буде залежати від товщини плити.

За умов впливу стандартного температурного режиму пожежі час займання OSB-плити буде залежати від її товщини. Якщо час досягнення температури 240...270 °С для плити товщиною 10 мм становить 160–198 с, то для плити товщиною 1 000 мм цей час складатиме 52–70 с, а для плити товщиною 2 000 мм – 36–47 с. Це пояснюється тим, що деревина має відносно низький коефіцієнт теплопровідності, а за малих товщин тепло встигає пройти крізь плиту та розсіятись у довкіллі. За більшої товщини плити тепло накопичується у конструкції та не встигає швидко проходити крізь плиту, тому процес нагрівання пришвидшується.

Висновок. На основі проведених досліджень встановлено, що час нагрівання поверхні OSB-плити залежно від впливу різної інтенсивності теплового потоку буде змінюватись. Також на час нагрівання буде впливати і товщина OSB-плити, але лише в межах до 30 мм за інтенсивності до 5 кВт/м². За інтенсивності теплового потоку від 5 кВт/м² товщина конструкції не впливатиме на час досягнення температури займання.

За умов впливу стандартного температурного режиму пожежі збільшення товщини OSB-плити зменшуватиме час нагрівання до температури займання.

Ключові слова: OSB/3-плита, тепловий потік, стандартний температурний режим пожежі, температура займання.

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF FIRE PARAMETERS ON THE HEATING OF ORIENTED-STAINLESS STEEL BOARDS

Problem. Wood is a common building material and the basis for OSB boards – three-layer composites of pressed chips and synthetic resins. At the same time, their significant disadvantage is flammability: wood ignition begins at 240–270 °C, and self-ignition – at 350–450 °C. This work investigates the influence of heat flux intensity and standard fire temperature regime on heating OSB boards to the ignition temperature.

The aim of the article is a study of the effect of OSB/3 board thickness on fire hazard indicators, in particular flame spread and flammability group.

Research methods. The work uses the method of mathematical modeling of heat transfer processes in flat structures using the differential equation of heat conduction and boundary conditions of the second and third kind.

Results. Based on the conducted research, it was found that the time to reach the ignition temperature or self-ignition of the OSB board will depend on the intensity of the heat flux density that hits the surface of the board. At an intensity of the heat flux density from 1 to 5 kW, this change will be for thicknesses from 10 to 30 mm. For a thickness of 30 mm and more, the time to reach the ignition temperature or self-ignition will be virtually unchanged. For an intensity of the heat flux density from 8 kW and more, the time to reach the ignition temperature or self-ignition will not depend on the thickness of the board.

Under the influence of a standard temperature regime of fire, the ignition time of the OSB board will depend on its thickness. If the time to reach a temperature of 240...270 °C for a 10 mm thick plate is 160–198 s, then for a 1 000 mm thick plate this time will be 52–70 s, and for a 2 000 mm thick plate – 36–47 s. This is explained by the fact that wood has a relatively low thermal conductivity coefficient and at small thicknesses the heat manages to pass through the plate and dissipate into the environment. At a greater thickness of the plate, the heat accumulates in the structure and does not have time to pass quickly through the plate, so the heating process accelerates.

Conclusion. Based on the conducted research, it was found that the heating time of the OSB plate surface will vary depending on the influence of different heat flux intensities. The thickness of the OSB plate will also affect the heating time, but only within the limits of up to 30 mm at an intensity of up to 5 kW/m². At a heat flux intensity of 5 kW/m², the thickness of the structure will not affect the time to reach the ignition temperature.

Under the influence of the standard temperature regime of fire, increasing the thickness of the OSB plate will reduce the heating time to the ignition temperature.

Key words: OSB/3 board, heat flow, standard fire temperature, ignition temperature.

Постановка проблеми. Деревина є одним з найпоширеніших матеріалів, що активно застосовується в будівництві. Вона також є основою для виготовлення деревинно-композитних матеріалів, зокрема плит OSB [1]. Ці плити являють собою тришаровий композиційний матеріал, створений з деревної стружки пелюстко-подібної форми, яка піддається пресуванню під високим тиском і температурою з використанням синтетичних смол у ролі сполучної речовини.

Проте одним з вагомих недоліків плит OSB, як й інших будівельних матеріалів на деревній основі, є їхня горючість. Відомо, що деревина займається за температури в діапазоні 240...270 °C, а самозаймання відбувається за температури 350...450 °C [1]. Враховуючи широке застосування плит OSB в будівельній галузі, а також їхні показники пожежонебезпечності, актуальним вважаємо дослідження процесів

нагрівання до температури займання внаслідок впливу пожежі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Сьогодні питанню дослідження поведінки OSB-плит в умовах теплового нагрівання присвячено не дуже багато робіт. Так, у джерелах [2; 3; 4] автори досліджують вплив конструктивних параметрів дерев'яних балок на вогнестійкість в умовах теплової дії високих температур під час пожежі. Як вогнезахисне облицювання для цих балок використовуються OSB-плити та вогнезахисна фанера. На основі проведених вогневих випробувань було визначено температурні розподіли всередині зразків дерев'яних балок під впливом стандартного температурного режиму пожежі, розроблено методику інтерполяції температурних розподілів всередині зразків-фрагментів дерев'яної балки, а також методику математичного описання геометричної форми зони

обвуглювання у перерізі дерев'яної балки без вогнезахисту та з вогнезахисним облицюванням на основі OSB-плит.

У своїй роботі [5] автори проводили комп'ютерне моделювання розподілу температури всередині дерев'яної балки з вогнезахисними OSB-плитами.

Однак у цитованих наукових публікаціях питання дослідження впливу стандартного температурного режиму пожежі та теплових потоків різної величини на температуру займання OSB-плити різної товщини не розглядалось.

Мета статті. Метою роботи є дослідження часу досягнення температури займання (240–270 °C) OSB-плити різної товщини залежно від інтенсивності густини теплового потоку, від 500 Вт/м² до 11 кВт/м², а також залежно від впливу стандартного температурного режиму пожежі.

Виклад основного матеріалу. Першим етапом дослідження було проведення моделювання впливу теплового потоку різної інтенсивності на нагрівання поверхні OSB-плити різної товщини. Для математичного моделювання цього процесу за умов впливу густини теплового потоку різної інтенсивності (від 500 Вт до 11 кВт) на OSB-плити різної товщини було використано математичну модель процесу теплообміну, яка включає диференціальне рівняння теплопровідності [6; 7]:

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) \quad (1)$$

за початкової умови:

$$t(x, 0) = 20, \quad (2)$$

та з крайовими умовами:

$$\begin{cases} \lambda \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial \tau} = q_0, \\ \lambda \frac{\partial t(l, \tau)}{\partial \tau} = \alpha_l (t_c - t(l, \tau)). \end{cases} \quad (3)$$

У формулі (3) перша рівність описує інтенсивність густини теплового потоку, яка потрапляє на поверхню OSB-плити (приймались 500 Вт, 1 кВт, 2 кВт, 3 кВт, 5 кВт, 8 кВт та 11 кВт). Друга рівність – це крайова умова третього роду, яка описує процес відведення тепла з поверхні, яка не обігривається, у довкілля.

Під час математичного моделювання приймалися такі параметри OSB-плити: питома теплоємність матеріалу $c = 1700$ Дж/кг · К, густина $\rho = 600$ кг/м³, коефіцієнт теплопровідності $\lambda = 0,13$ Вт/м · К, температура середовища з боку поверхні, яка не обігривається $t_c = 20$ °C, коефіцієнт теплообміну між OSB-плитою та довкіллям $\alpha_1 = 4$ Вт/м² · К, початкова температура становила 20 °C.

З розв'язком поставленої задачі (1–3) детально можна ознайомитись у джерелі [6]. Дослідження проводилось до досягнення поверхнею OSB-плити температури 240...270 °C для взірців товщиною від 10 мм до 1000 мм. Всього було проведено 11 досліджень для різної інтенсивності теплового потоку. Результати моделювання наведено в табл. 1.

Аналіз табл. 1 свідчить про те, що час досягнення температури займання або самозаймання OSB-плити буде залежати від інтенсивності густини теплового потоку, який потрапляє на поверхню плити. За інтенсивності густини теплового потоку від 1 до 5 кВт ця зміна буде для товщин від 10 до 30 мм. Для товщини 30 мм і більше час досягнення температури займання або самозаймання буде фактично незмінним. Для інтенсивності густини теплового потоку від 8 кВт і більше час досягнення температури займання або самозаймання не буде залежати від товщини плити.

Другим етапом дослідження було проведення моделювання впливу стандартного температурного режиму пожежі на нагрівання поверхні OSB-плити різної товщини. Для математичного моделювання цього процесу було використано математичну модель процесу теплообміну, яка включає диференціальне рівняння теплопровідності (1) за початкової умови (3) та з крайовими умовами третього роду:

$$\begin{cases} \lambda \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial \tau} = -\alpha_0 (t_{cm} - t(0, \tau)), \\ \lambda \frac{\partial t(l, \tau)}{\partial \tau} = \alpha_l (t_c - t(l, \tau)), \end{cases} \quad (4)$$

Під час математичного моделювання приймалися параметри, як і в першому дослідженні, лише були змінені крайові умови. Замість впливу теплового потоку приймався закон зміни температури середовища пожежі (стандартний температурний режим) $t_{cm} = 3451g(8\tau + 1) + 20$ за коефіцієнта теплообміну між середовищем пожежі та OSB-плитою $\alpha_0 = 25$ Вт/м² · К, температура середовища з боку поверхні, яка не обігривається $t_c = 20$ °C, коефіцієнт теплообміну між OSB-плитою та довкіллям $\alpha_2 = 4$ Вт/м² · К, початкова температура становила 20 °C.

Дослідження проводилось до досягнення поверхнею OSB-плити температури 240...270 °C для взірців товщиною від 10 мм до 2 000 мм. Всього було проведено 22 дослідження. Результати моделювання наведено в табл. 2.

Аналіз табл. 2 свідчить про те, що час займання OSB-плити буде залежати від її товщини. Якщо час досягнення температури 240...270 °C для плити товщиною 10 мм становить 160–198 с, то

Час досягнення температури займання OSB-плити

500 Вт											
Товщина плити, мм	10	12	18	22	30	40	50	100	200	500	1 000
Час досягнення температури 240 °C, с	макс. 183 °C	макс. 191 °C	макс. 214 °C	макс. 229 °C	23 500	20 400	19 900	20 200	20 200	20 200	20 200
Час досягнення температури 270 °C, с	макс. 183 °C	макс. 191 °C	макс. 214 °C	макс. 229 °C	макс. 260 °C	31 000	27 200	26 100	26 100	26 100	26 100
1 кВт											
Товщина плити, мм	10	12	18	22	30	40	50	100	200	500	1 000
Час досягнення температури 240 °C, с	2 935	3 245	3 945	4 270	4 695	4 945	5 025	5 045	5 045	5 045	5 045
Час досягнення температури 270 °C, с	3 860	4 215	5 015	5 400	5 930	6 295	6 445	6 510	6 510	6 510	6 510
2 кВт											
Товщина плити, мм	10	12	18	22	30	40	50	100	200	500	1 000
Час досягнення температури 240 °C, с	939	1 034	1 200	1 241	1 260	1 261	1 261	1 261	1 261	1 261	1 261
Час досягнення температури 270 °C, с	1 141	1 264	1 500	1 575	1 622	1 628	1 628	1 628	1 628	1 628	1 628
3 кВт											
Товщина плити, мм	10	12	18	22	30	40	50	100	200	500	1 000
Час досягнення температури 240 °C, с	499	530	559	560	561	561	561	561	561	561	561
Час досягнення температури 270 °C, с	613	660	717	723	724	724	724	724	724	724	724
5 кВт											
Товщина плити, мм	10	12	18	22	30	40	50	100	200	500	1 000
Час досягнення температури 240 °C, с	499	530	559	560	561	561	561	561	561	561	561
Час досягнення температури 270 °C, с	613	660	717	723	724	724	724	724	724	724	724
8 кВт											
Товщина плити, мм	10	12	18	22	30	40	50	100	200	500	1 000
Час досягнення температури 240 °C, с	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79
Час досягнення температури 270 °C, с	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102
11 кВт											
Товщина плити, мм	10	12	18	22	30	40	50	100	200	500	1 000
Час досягнення температури 240 °C, с	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
Час досягнення температури 270 °C, с	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54

Таблиця 2

Час досягнення температури займання OSB-плити

Товщина плити, мм	10	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900
Час досягнення температури 240 °C, с	160	160	160	157	145	125	103	84	71	63	56
Час досягнення температури 270 °C, с	198	198	198	195	185	165	140	117	99	86	77
Товщина плити, мм	1 000	1 100	1 200	1 300	1 400	1 500	1 600	1 700	1 800	1 900	2 000
Час досягнення температури 240 °C, с	52	48	45	43	41	40	38	37	37	36	36
Час досягнення температури 270 °C, с	70	65	61	58	55	53	52	50	49	48	47

для плити товщиною 1 000 мм цей час складатиме 52–70 с, а для плити товщиною 2000 мм – 36–47 с. Це пояснюється тим, що деревина має відносно низький коефіцієнт теплопровідності $\lambda = 0,13 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$, тож за малих товщин тепло встигає пройти крізь плиту та розсіятись у довкіллі. За більшої товщини плити тепло накопичується у конструкції та не встигає швидко проходити крізь плиту, тому процес нагрівання пришвидшується..

Висновки. На основі проведених досліджень встановлено, що час нагрівання поверхні OSB-плити, залежно від впливу різної інтенсивності теплового потоку, буде змінюватись. Це значення зменшується у 2 рази для товщини плити 600 мм, у 3 рази – для товщини 1 000 мм, у 4 рази – для товщини 2 000 мм.

Також на час нагрівання буде впливати товщина OSB-плити, але лише в межах до 30 мм за інтенсивності до 5 кВт/м^2 . За інтенсивності теплового потоку від 5 кВт/м^2 товщина конструкції не впливатиме на час досягнення температури займання.

За умови впливу стандартного температурного режиму пожежі збільшення товщини OSB-плити зменшуватиме час нагрівання до температури займання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сірко З., Цапко О., Торчилевський Д., Цапко Ю., Бондаренко О., Апанасенко В. Вогнезахист дерев'яних будівельних конструкцій. *Шляхи підвищення ефективності будівництва*. 2023. № 1(51). С. 241–249. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.51\(1\).241-249](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.51(1).241-249)
2. Поздєєв С., Новгородченко А., Змага Я., Новгородченко В. Дослідження температурних розподілів у перерізах дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2024. № 8(1). С. 83–90. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2024.8.1.83.90>
3. Поздєєв С., Некора О., Змага М., Змага Я., Новгородченко, А. Результати дослідження швидкості обуглювання фрагментів дерев'яних балок з облицюванням двох типів. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2023. № 7(1). С. 119–130.
4. Поздєєв С., Новгородченко А., Змага Я., Новгородченко В., Шналь Т. Математичне моделювання для описання ліній контурів обугленої зони дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2024. № 8(2). С. 94–103.
5. Новгородченко В., Новгородченко А., Кравченко С. Комп'ютерне моделювання температурних розподілів всередині вогнезахисної дерев'яної балки. *Збірник матеріалів III Всеукраїнської наукової конференції студентів та молодих вчених «Нау-*

кові досягнення та відкриття сучасної молоді» 29 травня 2024. Луцьк, 2024. С. 174–177.

6. Тацій Р., Пазен О. Прямий метод розрахунку нестационарного температурного поля за умов пожежі. *Пожежна безпека*. 2015. № 26. С. 156–166.

7. Терлецький Ю., Пазен О., Петровський В. Вплив товщини OSB/3-плити на показники пожежної небезпеки. *Пожежна безпека*. 2023. № 43. С. 153–157. DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.43.2023.17>

REFERENCES

1. Sirko, Z., Tsapko, O., Torchylevs'kyi, D., Tsapko, Yu., Bondarenko, O., & Apanasenko, V. (2023). Vohnezakhyst derev'yanykh budivel'nykh konstruktsiy [Fire protection of wooden building structures]. *Shlyakhy pidvyshchennya efektyvnosti budivnytstva*, 1 (51), s. 241–249. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.51\(1\).241-249](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.51(1).241-249)
2. Pozdyeyev, S., Novhorodchenko, A., Zmaha, Ya., & Novhorodchenko, V. (2024). Doslidzhennya temperaturnykh rozpodilen' u pererizakh derev'yanykh balok iz vohnezakhysnym oblytsyuvanniam [Study of temperature distributions in cross-sections of wooden beams with fire-retardant cladding]. *Nadzvychni sytuatsiyi: poperedzhennya ta likvidatsiya*, 8 (1), 83–90. <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2024.8.1.83.90>
3. Pozdyeyev, S., Nekora, O., Zmaha, M., Zmaha, Ya., & Novhorodchenko, A. (2023). Rezul'taty doslidzhennya shvydkosti obvuhlyuvannya frahmentiv derev'yanykh balok z oblytsyuvanniam dvokh typiv [Results of a study of the charring rate of fragments of wooden beams with two types of cladding]. *Nadzvychni sytuatsiyi: poperedzhennya ta likvidatsiya*, 7 (1), 119–130.
4. Pozdyeyev, S., Novhorodchenko, A., Zmaha, Ya., Novhorodchenko, V., & Shnal', T. (2024). Matematychnye modelyuvannya dlya opysannya liniy konturiv obvuhlenoyi zony derev'yanykh balok iz vohnezakhysnym oblytsyuvanniam [Mathematical modeling for describing the contour lines of the charred zone of wooden beams with fireproof cladding]. *Nadzvychni sytuatsiyi: poperedzhennya ta likvidatsiya*, 8(2), 94–103.
5. Novhorodchenko, V., Novhorodchenko, A., & Kravchenko, S. (2024). Komp'yuterne modelyuvannya temperaturnykh rozpodiliv vsередyni vohnezakhyschenoyi derev'yanoyi balky [Computer modeling of temperature distributions inside a fire-resistant wooden beam]. *Zbirnyk materialiv III Vseukrayins'koyi naukovoyi konferentsiyi studentiv ta molodykh vchenykh "Naukovi dosyahnennya ta vidkryttya suchasnoyi molodi"*, 29 travnya 2024, m. Luts'k. S. 174–177.
6. Tatsiy, R., & Pazen, O. (2015) Pryamyi metod rozrakhunku nestatsionarnoho temperaturnoho polya za umov pozhhezhi [Direct method for calculating the non-stationary temperature field under fire conditions].

Zbirnyk naukovykh prats' Pozhezhna bezpeka, № 26, s. 156–166.

7. Terlets'kyi, Y., Pazen, O., & Petrovs'kyi, V. (2023). Vplyv tovshchyny osb/3 plyty na pokaznyky

pozhezhnoyi nebezpeky [The influence of the thickness of the OSB/3 board on fire hazard indicators]. Pozhezhna bezpeka, № 43, 153–157. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.43.2023.17>

© Ю. О. Терлецкий, О. Ю. Пазен, Р. М. Тацій, А. С. Лин

Науково-методична стаття

Надійшла до редакції 25.04.2025

Прийнято до публікації 04.06.2025

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

БОЙЧУК Богдан Ярославович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, заступник начальника факультету з виховної роботи факультету пожежної та техногенної безпеки. доктор філософії, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4343-8822>

БОРЗОВ Юрій Олексійович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, доцент кафедри інформаційних технологій та систем електронних комунікацій, кандидат технічних наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0604-0498>

БОРОВИКОВ Володимирович Олександрович, Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, провідний науковий співробітник відділу електротехнічних виробів Науково-випробувального центру, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6364-2428>

ВЕЛИКИЙ Ярема Богданович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, старший викладач кафедри пожежної тактики та аварійно – рятувальних робіт, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3241-5211>

ВЕСЕЛИВСЬКИЙ Роман Богданович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності докторант денної форми навчання докторантури-ад'юнктури, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3266-578X>;

ВОВК Сергій Ярославович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, кандидат технічних наук, доцент, докторант докторантури-ад'юнктури, 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>

ВОЙТОВИЧ Олександр Петрович, Головне управління ДСНС України у Львівській області старший помічник начальника зміни (з питань оперативного реагування) чергової зміни оперативно-координаційного центру, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-7042-1010>

ВОЙТОВИЧ Тетяна Мирославівна, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, начальник відділу науково-редакційної діяльності науково-дослідного центру, доктор філософії, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6375-6548>

ГРІДАСОВ Іван Сергійович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, старший викладач кафедри наглядно-профілактичної діяльності та пожежної автоматики навчально-наукового інституту пожежної та техногенної безпеки ЛДУБЖД, майор служби цивільного захисту, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6671-8799>

ГУЗАР Назар Ігорович, Львівський державний університет безпеки Життєдіяльності, ад'юнкт ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7189-6545>

ДОВБНЯК Віра Йосипівна, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, викладач кафедри інформаційних технологій та систем електронних комунікацій, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7971-9873>

ЖЕЗЛО-ХЛЕВНА Наталія Володимирівна, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, викладач кафедри інформаційних технологій та систем електронних комунікацій, ORCID: <https://orcid.org/-0005-3768-2863>

КАЛУЖНЯК Ігор Іванович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності. ад'юнкт докторантури-ад'юнктури, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1101-1403>

КОВАЛИШИН Василь Васильович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, професор кафедри цивільного захисту, доктор технічних наук, професор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5463-0230>

КОВАЛИШИН Володимир Васильович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, начальник кафедри управління діяльністю підрозділів цивільного захисту інституту післядипломної освіти ЛДУБЖД, полковник цивільного захисту, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3739-8668>

КОНАНЕЦЬ Роман Миколайович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, заступник начальника кафедри пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт, доктор філософії, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2360-4002>

- КРАВЕЦЬ Ігор Петрович**, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, доцент кафедри експлуатації транспортних засобів та пожежно-рятувальної техніки, кандидат технічних наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3146-7952>
- КУШНІР Андрій Петрович**, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, доцент кафедри наглядово-профілактичної діяльності та пожежної автоматики, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6946-8395>
- ЛАВРЕНЮК Олена Іванівна**, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, професор кафедри фізики та хімії горіння, доктор хімічних наук, професор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5583-9992> Scopus: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701490381>
- 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>
- ЛИН Андрій Степанович**, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4012-4556>
- ЛУЩ Василь Іванови**, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, начальник кафедри пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт, кандидат технічних наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5931-3181>
- МАРИЧ Володимир Михайлович**, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, старший викладач кафедри промислової безпеки та охорони праці, кандидат технічних наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7051-4494>
- МИРОШКІН Володимир Сергійович**, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, ад'юнкт, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3907-6945>
- МИХАЛЧКО Борис Миронович**, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, професор кафедри фізики та хімії горіння, доктор хімічних наук, професор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5583-9992> Scopus: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701490381>
- НАЗАР Юлія Сергіївна**, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, старший викладач кафедри інформаційних технологій та систем електронних комунікацій, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0151-8285>
- ПАЗЕН Олег Юрійович**, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, кандидат технічних наук, начальник кафедри наглядово-профілактичної діяльності та пожежної автоматики, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1655-3825>
- ПАРХОМЕНКО Володимир-Петро Олегович**, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, доцент кафедри пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт, кандидат технічних наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7431-4801> Scopus: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57202457089> <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59149617800>
- ПАРХОМЕНКО Руслан Володимирович**, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, доцент кафедри пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт, кандидат технічних наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2954-6767>
- ПЕЛЕХ Роман Львович**, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, ад'юнкт денної форми навчання докторантури-ад'юнктури, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9078-8131>
- ПЕЛЕШКО Марта Зенонівна**, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, доцент кафедри наглядово-профілактичної діяльності та пожежної автоматики, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9315-1590>
- ПЕТРЕНКО Андріан Андрійович**, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, курсант, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2403-6338>
- ПЕТРЕНКО Вікторія Сергіївна**, Херсонський державний університет, доктор економічних наук, доцентка, завідувачка кафедри фінансів, обліку та підприємництва, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8336-7665>
- ПОЛІЩУК Ігор Михайлович**, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, викладач кафедри спеціально-рятувальної підготовки та фізичного виховання, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5221-8885>
- САУХ Олександр Миколайович**, Херсонський державний університет старший викладач кафедри фінансів, обліку та підприємництва, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0040-8957>

СЛУЦЬКА Оксана Михайлівна, Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, начальник сектору техногенної безпеки Науково-дослідного центру цивільного захисту, кандидат технічних наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1723-8181>

СМОЛЯК Дмитро Володимирович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, доцент кафедри спеціально-рятувальної підготовки та фізичного виховання, доктор філософії, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5458-326X>;

СУКАЧ Роман Юрійович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, доцент, доцент кафедри пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт, кандидат технічних наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4174-9213>

ТАЦІЙ Роман Мар'янович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри прикладної математики і механіки, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7764-2528>

ТЕРЛЕЦЬКИЙ Юрій Олегович, ТОВ «СВІСС КРОНО», аспірант вечірньої форми навчання, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1633-5458>

ТКАЧЕНКО Руслан Станіславович, Вище професійне училище Львівського державного університету безпеки життєдіяльності, начальник відділення-майстер виробничого навчання навчального відділення організації газодимозахисної служби, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5364-814X>

ФЕРЕНЦ Надія Олександрівна, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри наглядово-профілактичної діяльності та пожежної автоматики, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3139-0921>

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>

ШАПОВАЛОВ Олег Валерійович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри наглядово-профілактичної діяльності та пожежної автоматики ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8444-2006>