



ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ БЕЗПЕКИ
ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

МАТЕРІАЛИ ДРУКУЮТЬСЯ УКРАЇНСЬКОЮ,
АНГЛІЙСЬКОЮ ТА ПОЛЬСЬКОЮ МОВАМИ

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

ПОЖЕЖНА
БЕЗПЕКА

ЛДУБЖД

№ 48, 2026

заснований у 2002 році

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР

Паснак Іван Васильович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри експлуатації транспортних засобів та пожежно-рятувальної техніки, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ

Вальчак Аґата (Walczak Agata), доктор наук, професор, професор університету, Університет Пожежної Безпеки, Республіка Польща

Васік Віктор (Wasik Wiktor), доктор філософії, доцент, доцент, Університет Пожежної Безпеки, Республіка Польща

Веселівський Роман Богданович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри цивільного захисту, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна

Ковалишин Василь Васильович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри експлуатації транспортних засобів та аварійно-рятувальних робіт, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна

Костенко Віктор Климентович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри природоохоронної діяльності, Донецький національний технічний університет, Україна

Красуський Адам (Krasuski Adam), доктор наук, професор, директор Інституту техніки безпеки, Університет Пожежної Безпеки, Республіка Польща

Кузик Андрій Данилович, доктор сільськогосподарських наук, професор, завідувач кафедри екологічної безпеки, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна

Лавренюк Олена Іванівна, доктор технічних наук, професор, професор кафедри фізики та хімії горіння, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна

Пазен Олег Юрійович, кандидат технічних наук, начальник кафедри превентивної діяльності у сфері пожежної та техногенної безпеки, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна

Попович Василь Васильович, доктор технічних наук, професор, проректор університету з наукової роботи, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна

Птак Шимон (Ptak Szymon), доктор філософії, старший дослідник, завідувач кафедри пожежної техніки, Університет Пожежної Безпеки, Республіка Польща

Ренкас Артур Андрійович, кандидат технічних наук, доцент, заступник начальника управління освіти, науки та спорту – начальник відділу вищої освіти, Державна служба України з надзвичайних ситуацій, Україна

Субота Андрій Вікторович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри міського будівництва та господарства, Ужгородський національний університет, Україна

Шналь Тарас Миколайович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри будівельних конструкцій та мостів, Національний університет «Львівська політехніка», Україна

Яковчук Роман Святославович, доктор технічних наук, доцент, начальник навчально-наукового інституту цивільного захисту, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна



Видавничий дім

«Гельветика»

2026

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

DOI: 10.32447/20786662.48.2026.00

ЗАСНОВНИКИ

Львівський державний університет
безпеки життєдіяльності (ЛДУБЖД)

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 № 12 від 29.04.2026 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.

Дата розміщення онлайн: 29.05.2026. Дата друку: 05.06.2026.

Формат 60x84⁸. Ум. друк. арк. 19,07. Зам. № 0526/560. Наклад 150 прим.

Гарнітура Times New Roman. Папір офсетний. Цифровий друк.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

65101, м. Одеса, вул. Інглєзі, 6/1

Телефон +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08

E-mail: mailbox@helvetica.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 7623 від 22.06.2022 р.

ЗМІСТ

В. М. Баланюк, Н. І. Гузар
ВПЛИВ ДОБАВОК КАТАЛІЗАТОРІВ
НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ
ХАРАКТЕРИСТИКИ
АЕРОЗОЛЬУТВОРЮВАЛЬНИХ
СПОЛУК

6

**Д. П. Войтович, Р. Ю. Сукач,
О. Р. Воронко**
ОСОБЛИВОСТІ ФІЗИЧНОЇ ТА
ФІЗІОЛОГІЧНОЇ ПІДГОТОВКИ
РЯТУВАЛЬНИКІВ В УМОВАХ
ВЕДЕННЯ ОПЕРАТИВНИХ ДІЙ
З ГАСІННЯ ПОЖЕЖ ПІД ЧАС ВІЙНИ

13

**Н. В. Жезло-Хлевна, О. В. Хлевной,
О. О. Карабин, Ю. С. Назар,
В. М. Пилипенко**
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ
ЕНЕРГОЗАТРАТ ОСІБ З ПРОТЕЗАМИ
В КОНТЕКСТІ ОПТИМІЗАЦІЇ
ЕВАКУАЦІЇ ПРИ ПОЖЕЖІ

22

М. В. Іщук
АНАЛІЗ ТАКТИЧНИХ
МОЖЛИВОСТЕЙ НАЗЕМНОГО
РОБОТИЗОВАНОГО КОМПЛЕКСУ
ДЛЯ ПОЖЕЖОГАСІННЯ
ТА ФОРМУВАННЯ РЕКОМЕНДАЦІЙ
ЩОДО ЙОГО УДОСКОНАЛЕННЯ

33

**А. М. Кастраниць, М. І. Тацій,
С. С. Сергєєв**
ШЛЯХИ ЦИФРОВІЗАЦІЇ
ДЕРЖАВНОГО НАГЛЯДУ
(КОНТРОЛЮ) У СФЕРІ ПОЖЕЖНОЇ
ТА ТЕХНОГЕННОЇ БЕЗПЕКИ:
РОЗРОБКА І АПРОБАЦІЯ
МОБІЛЬНОГО ДОДАТКА
«КАЛЬКУЛЯТОР РИЗИКУ»

41

**В. В. Ковалишин, В. М. Марич,
Р. Б. Веселівський,
Вол. В. Ковалишин, Н. Р. Великий,
Р. Я. Лозинський, Я. В. Геревич**
АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДИК
З ВИЗНАЧЕННЯМ ЕФЕКТИВНОСТІ
ГАСІННЯ ВОГНЕГАСНИМИ
РЕЧОВИНАМИ ЛІТІЙ-ІОННИХ
АКУМУЛЯТОРІВ

49

CONTENTS

V. M. Balanyuk, N. I. Huzar
INFLUENCE OF CATALYST
ADDITIVES ON THE PERFORMANCE
CHARACTERISTICS OF AEROSOL-
FORMING COMPOSITIONS

**D. P. Voytovych, R. Yu. Sukach,
O.R. Voronko**
FEATURES OF PHYSICAL AND
PHYSIOLOGICAL TRAINING OF
RESCUERS IN OPERATIONAL
FIREFIGHTING DURING WARTIME

**N. V. Zhezlo-Khlevna, O. V. Khlevnoi,
O. O. Karabyn, Yu. S. Nazar,
V. M. Pylypenko**
MATHEMATICAL MODEL OF ENERGY
EXPENDITURE OF PERSONS
WITH PROSTHESES IN THE CONTEXT
OF FIRE EVACUATION OPTIMIZATION

M. V. Ishchuk
ANALYSIS OF TACTICAL
CAPABILITIES OF A GROUND
ROBOTIC FIRE-FIGHTING
COMPLEX AND FORMULATION
OF RECOMMENDATIONS
FOR ITS IMPROVEMENT

**A. M. Kastranets, M. I. Tatsiy,
S. S. Serhieiev**
PATHWAYS TO DIGITALIZATION
OF STATE SUPERVISION (CONTROL)
IN THE FIELD OF FIRE
AND TECHNOLOGICAL SAFETY:
DEVELOPMENT AND TESTING
OF THE “RISK CALCULATOR”
MOBILE APP

**V. V. Kovalyshyn, V. M. Marych,
R. B. Veselivskyi, Vol. V. Kovalyshyn,
N. R. Velykyi, R. Ya. Lozynskyi,
Ya. V. Gerevych**
ANALYSIS OF EXISTING METHODS
FOR DETERMINING
THE EFFECTIVENESS
OF EXTINGUISHING LITHIUM-
ION BATTERIES WITH FIRE
EXTINGUISHING AGENTS

ЗМІСТ

А. Д. Кузык, Д. Р. Лозова
АСПЕКТИ ВПЛИВУ ЛІСОВИХ
ПОЖЕЖ НА ОБ'ЄКТИ,
РОЗТАШОВАНІ У ЛІСАХ
ТА НА ПРИЛЕГЛИХ ТЕРИТОРІЯХ

О. В. Лазаренко
АНАЛІЗ ПРОДУКТІВ ТЕРМІЧНОГО
РОЗКЛАДУ ЯК СПОСІБ РАНЬОГО
ВИЯВЛЕННЯ ЗАГОРАННЯ
ЛІТІЙ-ІОННИХ АКУМУЛЯТОРІВ
ЖИВЛЕННЯ

*В. І. Луц, Я. Б. Великий,
Р. М. Конанець, А. С. Лин,
Р. В. Пархоменко, Ю. Т. Судніцин,
Я. І. Федюк, Ю. І. Панчишин,
М. А. Кривуненко*
АНАЛІЗ ЗАСОБІВ ТА СПОСОБІВ
ЗАБОРУ ВОДИ ПОЖЕЖНИМИ
АВТОЦИСТЕРНАМИ
З ВІДКРИТИХ ВОДОДЖЕРЕЛ
ТА ЇХ УДОСКОНАЛЕННЯ

*М. В. Осадчук, В. В. Ніжник,
К. Д. Алмазов*
УДОСКОНАЛЕННЯ ГАСІННЯ
ПОЖЕЖ В ЕКОСИСТЕМАХ
ЗА ДОПОМОГОЮ КОМПРЕСІЙНОЇ
ПІНИ

*В.-П. О. Пархоменко,
Б. М. Михалічко, О. І. Лавренюк*
УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ
ГАСІННЯ ПОЖЕЖ КЛАСІВ
В ТА F АЕРОЗОЛЯМИ ВОДНИХ
ВОГНЕГАСНИХ РЕЧОВИН

Н. Ю. Соляник, О. Б. Назаровець
РИЗИКИ ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ
У ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ
ТА ШЛЯХИ ЇХ МІНІМІЗАЦІЇ

Ю. О. Терлецький, О. Ю. Пазен
ДИНАМІКА ЗМІНИ ТЕМПЕРАТУРИ
ПОБЛИЗУ ОСЕРЕДКУ ПОЖЕЖІ
В СКЛАДСЬКОМУ ПРИМІЩЕННІ

CONTENTS

A. D. Kuzyk, D. R. Lozova
ASPECTS OF THE IMPACT OF FOREST
FIRES ON OBJECTS LOCATED
IN FORESTS AND ADJACENT
TERRITORIES

O. V. Lazarenko
ANALYSIS OF THERMAL
DECOMPOSITION PRODUCTS
AS A METHOD FOR EARLY
DETECTION OF LITHIUM-ION
BATTERIES FIRE

*V. I. Lushch, Ya. B. Velykyi,
R. M. Konanets, A. S. Lun,
R. V. Parkhomenko, Yu. T. Sudnitsyn,
Ya. I. Fedyuk, Yu. I. Panchyshyn,
M. A. Kryvunenko*
ANALYSIS OF MEANS
AND METHODS OF WATER INTAKE
BY FIRE TANKERS FROM OPEN
WATER SOURCES AND THEIR
IMPROVEMENT

*M. V. Osadchuk, V. V. Nizhnyk,
K. D. Almazov*
IMPROVING FIRE SUPPRESSION
IN ECOSYSTEMS
USING COMPRESSED FOAM

*V.-P. O. Parkhomenko,
B. M. Mykhalichko, H. I. Lavrenyuk*
IMPROVING FIREFIGHTING
TECHNIQUES FOR CLASSES
B AND F FIRES BY AQUEOUS
FIRE EXTINGUISHING AGENTS
IN AEROSOL FORM

N. Yu. Solianyk, O. B. Nazarovets
FIRE RISKS IN PHOTOVOLTAIC
SYSTEMS AND WAYS TO MINIMIZE
THEM

Yu. O. Terletsnyi, O. Yu. Pazen
DYNAMICS OF TEMPERATURE
CHANGES NEAR THE FIRE CENTER
IN A WAREHOUSE

ЗМІСТ

**В. А. Цопа, С. І. Чеберячко,
Ю. І. Чеберячко, О. В. Дерюгін,
Г. І. Туровська**

РОЗРОБКА ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ
РИЗИКАМИ КОМПЛЕКСНИХ
НЕБЕЗПЕЧНИХ ПОДІЙ
(ІНЦИДЕНТІВ) НА ПРИКЛАДІ
НЕБЕЗПЕКИ ФЕЄРВЕРКІВ
ДЛЯ ПОВОЄННОЇ БЕЗПЕКОВОЇ
МОДЕЛІ УКРАЇНИ

Д. О. Шалапко, Н. В. Гречка
СЦЕНАРНО-ОРІЄНТОВАНИЙ
ПІДХІД ДО ОЦІНЮВАННЯ
ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ СУДНОВИХ
ЕНЕРГОУСТАНОВОК
ПРИ ВИКОРИСТАННІ ВОДНЮ
ЯК ДОМІШКИ ДО ДИЗЕЛЬНОГО
ПАЛИВА

**О. В. Шаповалов, С. Я. Вовк,
А. П. Кушнір, Н. О. Ференц**
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ
ВПЛИВУ ПОВІТРООБМІНУ
НА УТВОРЕННЯ НЕБЕЗПЕЧНИХ
ЧИННИКІВ ПОЖЕЖІ В ПРИМІЩЕННІ
КВАРТИРИ ВИСОТНОГО
ЖИТЛОВОГО БУДИНКУ

CONTENTS

122

**V. A. Tsopa, S. I. Cheberiachko,
Yu. I. Cheberiachko, O. V. Deriuhin,
H. I. Turovska**

DEVELOPMENT OF A RISK
MANAGEMENT PROCESS
FOR COMPLEX HAZARDOUS
INCIDENTS TOWARD A POST-WAR
SECURITY MODEL OF UKRAINE:
CASE STUDY OF FIREWORK
HAZARDS

135

D. O. Shalapko, N. V. Hrechka
SCENARIO-ORIENTED APPROACH TO
ASSESSING FIRE SAFETY
OF SHIP POWER PLANTS
USING HYDROGEN AS AN ADDITIVE
TO DIESEL FUEL

148

**O. V. Shapovalov, S. Ya. Vovk,
A. P. Kushnir, N. O. Ferents**
MATHEMATICAL MODELING
OF THE IMPACT OF AIR EXCHANGE
ON THE FORMATION
OF HAZARDOUS FIRE FACTORS
IN THE APARTMENT
OF A HIGH-RISE RESIDENTIAL
BUILDING



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.48.2026.01>

V. M. Balanyuk, N. I. Huzar

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0853-4229> – В. М. Баланюк

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

✉ bagr33@ukr.net

ВПЛИВ ДОБАВОК КАТАЛІЗАТОРІВ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЕРОЗОЛЬУТВОРЮВАЛЬНИХ СПОЛУК

Проблема. Пожежі на об'єктах нафтопереробної промисловості та нафтобазах, пов'язані з горінням легкозаймистих рідин, характеризуються високою інтенсивністю тепловиділення, швидким поширенням полум'я та значним виділенням токсичних продуктів горіння. Аналіз реальних пожеж показує складність їх ліквідації та необхідність удосконалення вогнегасних засобів. Перспективним напрямом є застосування вогнегасних аерозольутворювальних сполук (АУС), ефективність яких залежить від їх складу та умов горіння.

Мета. Метою роботи є дослідження впливу добавок каталізаторів на повноту згорання, швидкість горіння та вогнегасну ефективність аерозольутворювальних сполук з метою оптимізації їх складу для гасіння пожеж легкозаймистих рідин.

Методи дослідження. У роботі застосовано експериментальні методи дослідження, що передбачали визначення швидкості горіння АУС, температури горіння, вогнегасної концентрації та коефіцієнта перетворення сполуки в аерозоль. Дослідження проводились для різних варіантів рецептур із використанням каталізаторів (ферум(III) оксид (Fe_2O_3), ферум(II,III) оксид (Fe_3O_4), купрум(II) оксид (CuO)) та різних співвідношень компонентів.

Основні результати дослідження. Встановлено, що введення навіть незначних кількостей каталізаторів істотно впливає на експлуатаційні характеристики АУС. Зокрема, додавання 1 % Fe_2O_3 забезпечує зростання швидкості горіння АУС приблизно у 3 рази. Вогнегасна концентрація становить близько 24 г/м³. Використання каталізаторів підвищує коефіцієнт перетворення в аерозоль приблизно на 3–6 % та дозволяє регулювати швидкість горіння без втрати ефективності.

Висновки. Доведено, що застосування каталізаторів є ефективним способом підвищення експлуатаційних характеристик АУС. Запропоновані сполуки відзначаються високою ефективністю, простотою виготовлення та зниженою собівартістю.

Ключові слова: аерозольутворювальні сполуки, каталізатори горіння, вогнегасна ефективність, швидкість горіння, вогнегасна концентрація, легкозаймисті рідини, пожежогасіння.

V. M. Balanyuk, N. I. Huzar

Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine

INFLUENCE OF CATALYST ADDITIVES ON THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF AEROSOL-FORMING COMPOSITIONS

Problem. Fires at oil refining facilities and oil depots involving flammable liquids are characterized by high heat release rates, rapid flame spread, and significant emission of toxic combustion products. Analysis of real fires shows the complexity of their extinguishing and the need to improve fire suppression agents. A promising direction is the use of aerosol-forming compounds (AFCs), whose effectiveness depends on their composition and combustion conditions.

Objective. The aim of the study is to investigate the influence of catalyst additives on combustion completeness, burning rate, and fire-extinguishing efficiency of AFCs in order to optimize their composition for extinguishing flammable liquid fires.

Methods. Experimental methods were applied, including determination of AFC burning rate, combustion temperature, extinguishing concentration, and conversion coefficient into aerosol. Studies were conducted for different formulations using catalysts (Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , CuO) and various component ratios.

Results. It was established that even small amounts of catalysts significantly affect the operational characteristics of AFCs. In particular, the addition of 1 % Fe_2O_3 increases the burning rate of AFCs by 3 times. The extinguishing concentration is approximately 24 g/m^3 . The use of catalysts increases the conversion coefficient into aerosol by approximately 3–6 % and allows regulation of the burning rate without loss of efficiency.

Conclusions. The application of catalysts is proven to be an effective way to improve AFC characteristics. The proposed compounds are distinguished by high efficiency, ease of production, and reduced cost.

Key words: aerosol-forming compounds, combustion catalysts, fire-extinguishing efficiency, burning rate, extinguishing concentration, flammable liquids, fire suppression.

Постановка проблеми. Пожежі на об'єктах нафтопереробної промисловості становлять одну з найбільш небезпечних категорій аварій, пов'язаних із горючими рідинами. Висока швидкість поширення полум'я, інтенсивне тепловиділення, а також токсичність продуктів горіння ускладнюють процес локалізації та ліквідації таких інцидентів. Прикладом такої небезпечної події є пожежа, що сталася 25 серпня 2023 року на території нафтопереробного заводу Marathon Petroleum у місті Гарівілл (штат Луїзіана, США) [1]. За офіційними даними, приблизно о 6:50 ранку за місцевим часом було зафіксовано витік нафти з одного з резервуарів зберігання. Пари нафти, які швидко поширилися в зоні розливу, зайнялися, утворивши масштабне полум'я поблизу резервуара. Займання супроводжувалося стрімким розповсюдженням вогню в межах технологічного майданчика. Враховуючи властивості нафти як легкозаймистої рідини з низькою температурою спалаху (від 35 до 60 °C), процес горіння супроводжувався значним тепловим навантаженням (близько 2000 – 3000 кВт/м^2 у зоні максимального горіння). Полум'я досягало висоти понад 15 метрів, спричинивши небезпеку розповсюдження пожежі на сусідні резервуари. Пожежа тривала понад сім годин. У гасінні були задіяні місцеві пожежно-рятувальні підрозділи, аварійні бригади підприємства та екологічні моніторингові групи. Основними засобами гасіння виступали пінні генератори, стаціонарні лафетні стволи, а також автономні модулі із застосуванням водо-пінної суміші. Ефективність гасіння була обмежена через високу температуру і складність доступу до осередку горіння [2].

У результаті інциденту постраждало щонайменше вісім працівників, кілька з них були госпіталізовані з ознаками отруєння продуктами горіння. У прилеглих житлових районах було зафіксовано підвищення рівня токсичних речовин у повітрі, зокрема бензену. Серйозна аварія

сталася 15 жовтня 2019 року на паливному складі NuStar Energy в Крокетті, Каліфорнія, що призвела до вибуху та пожежі в двох резервуарах з етанолом. Перший вибух спричинив руйнування даху резервуара, який впав на сусідній резервуар, що призвело до другого вибуху. Кожен резервуар вмщував $126\,000$ галонів етанолу. Пожежа охопила площу близько 6 гектарів. Вогонь супроводжувався інтенсивним тепловим випромінюванням та утворенням великої кількості токсичних газів і часток, що потрапили в атмосферу. На місце події оперативно прибули понад 200 пожежних-рятувальників та обслуговуючий персонал. Для гасіння вогню використовували піну та воду для охолодження сусідніх резервуарів. Однак через відсутність належного доступу та відключену систему автоматичного пожежогасіння, пожежні-рятувальники зіткнулися з додатковими труднощами [3]. У ніч на 27 лютого 2022 року російські війська завдали ракетного удару по нафтобазі компанії KLO, розташованій у селі Крячки поблизу міста Васильків, Київської області. Близько $00:41$ за місцевим часом ракета влучила в резервуари з нафтопродуктами, спричинивши їх займання та серію вибухів. Пожежа швидко поширилася на значну площу, і загроза від неї була помітна навіть у Києві. Через інтенсивні бойові дії в районі Василькова, пожежно-рятувальні підрозділи не могли негайно приступити до гасіння пожежі. Горіння нафтопродуктів супроводжувалося виділенням великої кількості токсичних речовин, зокрема метанолу, що становили загрозу для здоров'я мешканців прилеглих населених пунктів. Пожежа на нафтобазі призвела до значних екологічних та матеріальних збитків. Викиди токсичних речовин у атмосферу спричинили забруднення повітря. Загиблих та поранених внаслідок пожежі не зафіксовано [4].

У ніч на 9 лютого 2024 року російські війська завдали удару по нафтобазі, розташованій у Немишлянському районі Харкова, за допомогою

безпілотних літальних апаратів типу “Шахед”. Близько 23:00 за місцевим часом три безпілотники влучили в резервуари з нафтопродуктами на території нафтобази по вулиці Єнакіївській, 3. Внаслідок удару виникла масштабна пожежа, яка швидко поширилася на прилеглі житлові будинки. За даними місцевої влади, повністю згоріли 15 житлових будинків, ще п’ять були значно пошкоджені. Загинули семеро людей, серед них троє дітей. Екологи зафіксували перевищення гранично допустимих концентрацій нафтопродуктів у повітрі та воді. Зокрема, у річці Немишлі концентрація нафтопродуктів перевищила норму у 95 разів. Пожежу гасили понад 60 годин. Гасіння ускладнювалося тим, що потрібно було чекати повного вигорання палива в резервуарах. Пожежні-рятувальники працювали в умовах високої температури та токсичного диму. Пожежу вдалося повністю ліквідувати лише вранці 12 лютого [5].

Пожежа на нафтобазі призвела до значних екологічних та матеріальних збитків. Викиди токсичних речовин у атмосферу спричинили забруднення повітря, води та ґрунту. Загальна сума збитків, завданих довкіллю, склала понад 157 мільйонів гривень.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Таким чином в результаті проведеного аналізу було встановлено, що питання гасіння пожеж горючих та легкозаймистих рідин є надзвичайно актуальним, а пожежі без ефективного гасіння набувають значних розмірів з катастрофічними наслідками (Табл.1.).

Таким чином, пожежі, що виникають внаслідок розливів легкозаймистих рідин (ЛЗР), є однією з найбільш небезпечних загроз в умовах сьогодення. Враховуючи високий рівень вибухопожежної небезпеки, особливо на відкритих територіях, виникає потреба в ефективних методах та речовинах для гасіння таких пожеж. Одним із перспективних напрямів вирішення цієї проблеми

є використання вогнегасних аерозольотворювальних сполук, які відзначаються високою вогнегасною ефективністю [6]. Вогнегасні аерозольотворювальні сполуки здатні знижувати температуру горіння та забезпечувати ефективне гасіння навіть на відкритому просторі [7]. Однак, для досягнення максимальної ефективності таких засобів необхідно оптимізувати їх склад, зокрема вплив каталітичних добавок на швидкість горіння, повноту згорання та визначити мінімальну вогнегасну концентрацію.

Актуальність даного дослідження полягає в потребі покращення експлуатаційних характеристик АУС шляхом впливу різноманітних комбінацій каталізаторів. Зокрема, важливо з’ясувати, як саме суміші оксидів металів та інших добавок можуть сприяти збільшенню швидкості горіння та покращенню вогнегасної ефективності. Визначення оптимальних умов для підвищення цих параметрів може значно поліпшити якість гасіння пожеж, особливо у випадках, коли швидкість та ефективність мають вирішальне значення.

Мета статті. Вивчення впливу добавок каталізаторів на швидкість, повноту згорання та вогнегасну ефективність вогнегасної аерозольотворювальної сполуки, та оптимізація складу АУС для швидкого та більш ефективного гасіння пожеж горючих та легкозаймистих рідин.

Виклад основного матеріалу. На даний момент існує значна кількість аерозольотворюючих сполук (АУС), для гасіння пожеж. Більшість сучасних АУС складаються з типових компонентів. Як окисники в рецептурах АУС найчастіше використовують калій нітрат (KNO_3), калій перхлорат ($KClO_4$), натрій нітрат ($NaNO_3$) та амоній перхлорат (NH_4ClO_4). Роль пального та одночасно зв’язуючої речовини в АУС виконують епоксидні й фенолоформальдегідні смоли, каучуки, а також інші органічні та неорганічні горючі компоненти. Додатково до складу АУС вводять газоутворювачі

Таблиця 1

Характеристика резонансних пожеж на об’єктах зберігання нафтопродуктів

№	Місце виникнення	Час виникнення	Час набуття пожежею максимальних показників	Площа пожежі	Тривалість пожежі від виникнення до повної ліквідації
1	Рівненська область, смт. Смига ур. Дружби, 1. Нафтобаза ЛВДС «5-С» (смт. Смига)	03 год. 48 хв	09 год. 07 хв	7000 м ²	19 год. 14 хв
2	База зберігання нафтопродуктів ТОВ «АТП-М» за адресою: м. Звягель	02 год. 30 хв	3 год. 05 хв	5700 м ²	20 год. 11 хв
3	Дослідно-промислова установка стабілізації газового конденсату в блочно-комплексному виконанні ТОВ «Сандарт-ОЙЛ-2000», м. Гадяч	18 год. 50 хв	04 год. 10 хв	600 м ²	9 год. 40 хв

(вуглець, диціандіамід, дифеніламін, гуанідин, карбамід, органічні полімери), а також спеціальні добавки: каталізатори та інгібітори горіння, що призначені для усунення форсу полум'я та оптимізації процесу аерозолеутворення [8]. Проте більшість з цих АУС мають ряд недоліків, зокрема вони являють собою багатокомпонентні суміші, що збільшує собівартість складу, мають досить високі температури горіння, в них неможливо регулювати швидкість та температуру горіння, а в склад аерозолу входить багато токсичних речовин. Крім того, виробництво відомих АУС потребує застосування складного обладнання та використання високовартісних компонентів, які використовуються як каталізатори або інгібітори горіння. Наприклад відома аерозольуюча сполука [9] в якій автори пропонують наступний склад % мас: 65–82 KNO_3 , від 3 до 13, KClO_4 , від 8 до 15, диціандіаміду та 4–10, епоксидної та фенолформальдегідної смоли та додатково від 3 до 10 оксаміду. Патент вказує, що для виготовлення зазначеної АУС необхідно змішувати компоненти АУС в розчиннику, потім пропускати отриману суміш через прокатний валок на різній швидкості та після видалення розчинника з суміші та подальшого подрібнення отриманої сухої суміші. Після чого суміш пресують, або нагрівають до 90 °С та заливають у відповідні форми. Недоліком зазначеної АУС є те, що при її виготовленні необхідно використання технологічно складних операцій та спеціального температурного режиму.

Відома [10] аерозольуюча суміш, яка містить натрій перхлорат, калій перхлорат та порошок магнію при наступному вмісті компонентів, мас. %: перхлорат натрію – 35,0–42,0; калій перхлорат – 48,0–55,0; порошок магнію – 8,0–10,0. В патенті вказано, що вогнегасна концентрація аерозолу складає близько 25–40 г/м³. Враховуючи, що зазначена АУС містить натрій перхлорат, калій перхлорат, температура горіння такої АУС буде близько 2200 °С, що значно вище ніж більшість АУС. Відповідно зазначена сполука незважаючи на відносну доступність компонентів та легкість виготовлення буде мати суттєвий недолік – високу температуру горіння, що ускладнює її використання при гасінні пожежі. На основі аналізу рецептур вищенаведених [8–10] АУС було запропоновано аерозольуючу сполуку АУС1, яка містить калій нітрат, сахарозу, ідітол, диціандіамід та деревну муку. Дана АУС1 характеризується відсутністю можливості регулювання швидкості горіння, неповним згоранням АУС. Неповне згорання не дозволяє АУС повністю перейти в аерозоль, відповідно після її згорання, залежно від співвідношення компонентів, залишається від

7,7 % до 27,0 % мас. незгорілого залишку, що відповідає експериментальним даним коефіцієнта перетворення. Зазначена АУС1 володіє наступною вогнегасною ефективністю, мінімальна концентрація спостерігається для етанолу 12–17 г/м³ і максимальна для гептану 21–26 г/м³ (Табл. 2).

Таблиця 2

Вогнегасна концентрація АУС1

Горюча речовина				
метан	гептан	диз. пальне	деревина	спирт етиловий
Середні вогнегасні концентрації, г/м ³				
16 – 27	21– 26	16– 22	15–24	12– 17

Випробовування АУС1 з попередньо наведеною рецептурою показали наступні результати, температура горіння АУС1 – 1473 К, форс полум'я мінімальний. Середня вогнегасна концентрація при гасінні складала в середньому 20 г/м³, час гасіння – менше 5 секунд, швидкість горіння від 0,5–0,6 мм/с. Мінімальна вогнегасна концентрація визначалась в камері об'ємом 0,5 м³. Суть методики з визначення мінімальної вогнегасної концентрації, полягала у визначенні мінімальної наважки АУС1, яка б забезпечувала гасіння тигля з н-гептаном до 2-х хвилин.

З метою підвищення швидкості горіння, покращення експлуатаційних характеристик та вогнегасної ефективності АУС можна використовувати каталізатори. Каталізатори, які використовуються в твердих піротехнічних сумішах [11], можна класифікувати за кількома критеріями: за хімічним складом та за механізмом дії. Основними типами каталізаторів є металеві порошки, оксиди металів, солі перехідних металів та рідкоземельні оксиди. Металеві порошки, такі як залізо (Fe), мідь (Cu), марганець (Mn), нікель (Ni), застосовуються, для прискорення процесу горіння завдяки їхній здатності виступати як каталізатори термічного розкладу окисників. Оксиди металів, такі як Fe_2O_3 , MnO_2 , CuO , прискорюють розклад окисників, знижуючи температуру запалювання суміші. Солі, наприклад, перманганати та ферроціаніди, також використовуються для впливу на іонні механізми реакцій [12].

Каталізатори впливають на кілька етапів процесу горіння, а саме зниження енергії активації, що дозволяє процесу початися при нижчих температурах, ініціація реакцій між паливом та окисником – пришвидшення переносу електронів і тепла та стабілізація процесу горіння – запобігання флуктуаціям температури та забезпечення рівномірного горіння.

У всіх випадках добавка каталізатора до АУС1 значно впливала на швидкість її горіння.

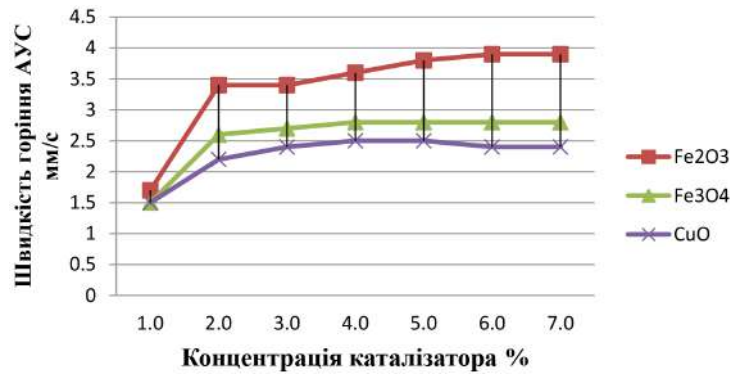


Рис. 1. Залежність швидкості горіння АУС від концентрації каталізаторів

При чому дія каталізаторів проявлялась вже при малих його концентраціях. Швидкість горіння при добавлянні каталізаторів ферум(III) оксиду, ферум(II,III) оксиду, купрум(II)оксиду, визначали фіксуючи час горіння циліндра АУС діаметром 10 мм та довжиною 70 мм. Циліндр АУС підпалювали з торця в горизонтальному положенні та вимірювали час горіння. Результати дії добавок каталізаторів ферум(III) оксиду, ферум(II,III) оксиду, купрум(II)оксиду показано на рис.

Як видно на графіку (рис. 1) всі зазначені каталізатори забезпечують зростання швидкості горіння, але добавка оксид заліза(III) при невеликих концентраціях значно збільшує швидкість горіння АУС. Відповідно при добавлянні лише 1 % мас Fe₂O₃ до АУС вказаної рецептури її швидкість горіння збільшується до 1,7 мм/с. При цьому значенні дещо нижчими є показники для Fe₃O₄ – 1,5 мм/с та CuO – 1,5 мм/с. При подальшому збільшенні концентрації добавок до 2 % динаміка зростання швидкості горіння відрізняється залежно від типу каталізатора. Зокрема, для найефективнішого з них – ферум(III) оксиду, цей показник різко збільшується до 3,4 мм/с, тоді як для ферум(II, III) оксиду та купрум(II) оксиду значення є дещо нижчими. При подальшому збільшенні концентрації каталізатора Fe₂O₃ від 3 % до 7 % швидкість згорання збільшується незначно, на 0,5 мм/с. Для

каталізаторів на основі заліза та CuO підвищення швидкості після 3 % не спостерігалось. Загалом порівнюючи характеристики горіння запропонованих АУС, можемо зробити висновок, що добавка навіть незначної кількості каталізаторів горіння до сполук АУС значно покращує техніко-експлуатаційні показники, зокрема можливість регулювати швидкість горіння, а також ступінь перетворення АУС в аерозоль та відповідно вогнегасну ефективність, у порівнянні з АУС без них, що корелюється з проблемами розглянутих та наведених в роботах [13–15]. Це можна побачити по результатам досліджень наведених в таблиці 3.

Як видно з даних, наведених в таблиці 3, композиція АУС на основі сахарози володіє коефіцієнтом перетворення в АУС в залежності від співвідношення компонентів від 73 % до 92,3 %. Коефіцієнт перетворення визначається різницею маси АУС та залишку після її спалювання. При добавлянні 1 % ферум(III) оксиду показник повноти їх згорання збільшується в середньому до 3 %. При цьому збільшення цього показника характерне для АУС з вмістом лише сахарози, або інших органічних палив, так і їх сумішей з ідіолом та деревною мукою в зазначених співвідношеннях (табл. 3). Також з отриманих даних можна зробити висновок, що наприклад добавляння такого каталізатора як ферум(III) оксид до АУС приводить до збільшення

Таблиця 3

Залежність коефіцієнта перетворення К % від співвідношення компонентів в АУС1

Вміст компонентів АУС1, % мас.					К, %	К, % при добавлянні 1 % Fe ₂ O ₃
Компоненти						
KNO ₃	ДЦДА	Сахароза	Ідітол	Деревна мука		
70	2	28	0,001	2	82,0	85,2
70	4	28	0,001	2	87,0	89,5
70	6	28	0,001	2	88,2	89,5
70	8	28	1	1	88,7	90,5
70	10	28	1	0,001	88,3	90,6
70	10	28	2	0,001	88,4	90,3
70	12	28	2	1	78,0	81,4
70	12	28	4	1	73,0	76,3
70	12	28	0,1	1	87,0	92,3

значення коефіцієнту перетворення (К) АУС в аерозоль. Це можна побачити в порівнянні результатів в таблиці 3. Дослідження зазначених рецептур показало, що вони володіють високою вогнегасною ефективністю та при зміні співвідношення компонентів в них можна регулювати швидкість горіння АУС без втрати вогнегасної ефективності.

Висновок. Вивчено вплив добавок каталізаторів на швидкість, повноту згорання та вогнегасну ефективність вогнегасної аерозольотворювальної сполуки. Встановлено, що найбільш ефективною добавкою-каталізатором є ферум(III) оксид (Fe_2O_3), який при концентрації лише 1 % збільшує швидкість горіння приблизно у 3,4 раза (до 1,7 мм/с), а при концентрації 2 % – майже у 6,8 раза (до 3,4 мм/с) порівняно з базовою сполукою без добавок. Це дозволить розробити нові рецептури АУС та пристрої гасіння на її основі, для швидкого та більш ефективного пожежога-сіння горючих та легкозаймистих рідин.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Fire at Louisiana oil refinery sends tower of black smoke into the air, but no injuries reported. *Associated Press* (AP News). 2023. URL: <https://apnews.com/article/8acd26a19faee26206ba61d570ac0b6a>

2. Marathon's Garyville, Louisiana, refinery fire nearly out, company says. *Reuters*. 2023. URL: <https://www.reuters.com/business/energy/marathon-shuts-some-garyville-refinery-units-2023-08-25/>

3. Hernández L. Improper grounding of equipment faulted in 2019 fiery ethanol tank explosion in East Bay. *San Francisco Chronicle*. 2021. URL: <https://www.sfchronicle.com/local/article/Improper-equipment-grounding-faulted-in-2019-16203701.php>

4. Russia hits oil depot of KLO gas station network in Vasyilkiv. *Ukrinform*. 2022. URL: <https://www.ukrinform.net/rubric-ato/3414345-russian-invasion-update-russia-hits-oil-depot-of-klo-gas-station-network-in-vasylkiv.html>

5. Russian drone strike on Kharkiv, Ukraine's 2nd largest city, kills 7. *AP News*. 2024. URL: <https://apnews.com/article/b5181631189a7a0d069f8ae26848cdef>

6. Rohilla M., Saxena A., Tyagi Y. K., Dixit P. K., Mishra G. K., Narang R. Aerosol forming compositions for fire fighting applications: a review. *Fire Technology*. 2019. Vol. 55, № 6. P. 2515–2545. DOI: 10.1007/s10694-019-00843-7

7. Rohilla M., Saxena A., Tyagi Y. K., Singh I., Tanwar R. K., Narang R. Condensed aerosol based fire-extinguishing system covering versatile applications: a review. *Fire Technology*. 2021. Vol. 57. P. 2951–2973. DOI: 10.1007/s10694-021-01148-4

8. Патент 2009072594 Японія, МПК А62D 1/00, А62D 1/02. Fire extinguishing aerosol generator; опубл. 2009.

9. Патент 77071 Україна, МПК А62D 1/06. Аерозольотворююча сполука для гасіння пожежі; опубл. 2006.

10. Патент 128972 Україна, МПК А62D 1/06. Аерозольотворююча сполука для гасіння пожежі (варіанти).

11. Richter E., Krause U. Development of solid propellant for the production of fire suppression aerosols. *Fire Safety Journal*. 2021. Vol. 120. P. 103113. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103113

12. Balanyuk V., Myroshkin V., Kopystynskyi Yu., Hirskyi O., Harasym'iuk O. Study of Fire-extinguishing Efficiency of Environmentally Friendly Binary Aerosol-nitrogen Mixtures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 3, № 10. P. 4–11. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.72399

13. Баланюк В. М., Мирошкін В. С., Копистинський Ю. О., Гірський О. І., Гарасим'юк О. І. Порівняння вогнегасних речовин для гасіння пожеж легкозаймистих та горючих рідин. *Пожежна безпека*. 2022. № 41. С. 12–19. DOI: 10.32447/20786662.41.2022.02

14. Баланюк В. М. Визначення ефективності гасіння вогнегасними аерозолями горючих рідин на відкритому просторі. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2015. № 5/10 (77). С. 15–20. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.51399

15. Баланюк В. М., Мирошкін В. С., Копистинський Ю. О., Гарасим'юк О. І., Гірський О. І., Гузар Н. І. та інш. Study of Efficiency Parameters for Using Fire-Extinguishing Aerosols to Suppress Flammable Liquid Fires in Open Spaces. *Key Engineering Materials*. 2024. Vol. 1020. P. 141–151. DOI: 10.4028/p-7xOPiH

REFERENCES

1. Associated Press. (2023). Fire at Louisiana oil refinery sends tower of black smoke into the air, but no injuries reported. *AP News*. Retrieved from: <https://apnews.com/article/8acd26a19faee26206ba61d570ac0b6a>

2. Reuters. (2023). Marathon's Garyville, Louisiana, refinery fire nearly out, company says. *Reuters*. Retrieved from: <https://www.reuters.com/business/energy/marathon-shuts-some-garyville-refinery-units-2023-08-25/>

3. Hernández, L. (2021). Improper grounding of equipment faulted in 2019 fiery ethanol tank explosion in East Bay. *San Francisco Chronicle*. Retrieved from: <https://www.sfchronicle.com/local/article/Improper-equipment-grounding-faulted-in-2019-16203701.php>

4. Ukrinform. (2022). Russia hits oil depot of KLO gas station network in Vasyilkiv. *Ukrinform*. Retrieved from: <https://www.ukrinform.net/rubric-ato/3414345-russian-invasion-update-russia-hits-oil-depot-of-klo-gas-station-network-in-vasylkiv.html>

5. Associated Press. (2024). Russian drone strike on Kharkiv, Ukraine's 2nd largest city, kills 7. *AP News*. Retrieved from: <https://apnews.com/article/b5181631189a7a0d069f8ae26848cdef>

6. Rohilla, M., Saxena, A., Tyagi, Y. K., Dixit, P. K., Mishra, G. K., & Narang, R. (2019). Aerosol forming compositions for fire fighting applications: A review. *Fire Technology*, 55(6), 2515–2545. <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00843-7>
7. Rohilla, M., Saxena, A., Tyagi, Y. K., Singh, I., Tanwar, R. K., & Narang, R. (2021). Condensed aerosol based fire-extinguishing system covering versatile applications: A review. *Fire Technology*, 57, 2951–2973. <https://doi.org/10.1007/s10694-021-01148-4>
8. Japan Patent No. 2009072594. (2009). *Fire extinguishing aerosol generator*.
9. Patent Ukrainy No. 77071. (2006). *Aerozol-forming composition for fire extinguishing*.
10. Patent Ukrainy No. 128972. (n.d.). *Aerozol-forming composition for fire extinguishing (variants)*. [in Ukrainian].
11. Richter, E., & Krause, U. (2021). Development of solid propellant for the production of fire suppression aerosols. *Fire Safety Journal*, 120, 103113. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103113>
12. Balanyuk, V., Myroshkin, V., Kopystynskyi, Yu., Hirskyi, O., & Harasym'iuk, O. (2016). Study of fire-extinguishing efficiency of environmentally friendly binary aerosol-nitrogen mixtures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(10), 4–11. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.72399>
13. Balaniuk, V. M., Myroshkin, V. S., Kopystynskyi, Yu. O., Hirskyi, O. I., & Harasym'iuk, O. I. (2022). *Porivniannia vohnehasnykh rehovyn dlia hasinnia pozhezh lehkozaymystykh ta horiuchykh ridyn* [Comparison of fire-extinguishing agents for flammable and combustible liquid fires]. *Pozhezhna bezpeka*, (41), 12–19. <https://doi.org/10.32447/20786662.41.2022.02> [in Ukrainian].
14. Balaniuk, V. M. (2015). *Vyznachennia efektyvnosti hasinnia vohnehasnykh aerosoliamy horiuchykh ridyn na vidkrytomu prostori* [Determination of the efficiency of extinguishing flammable liquids with fire-extinguishing aerosols in open space]. *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii*, 5/10(77), 15–20. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.51399> [in Ukrainian].
15. Balanyuk, V., Myroshkin, V., Kopystynskyi, Yu., Harasym'iuk, O., Hirskyi, O., & Huzar, N., et al. (2024). Study of efficiency parameters for using fire-extinguishing aerosols to suppress flammable liquid fires in open spaces. *Key Engineering Materials*, 1020, 141–151. <https://doi.org/10.4028/p-7xOPiH>

© В. М. Баланюк, Н. І. Гузар

Оглядова стаття

Дата першого надходження статті до видання: 05.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 29.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.48.2026.02>

Д. П. Войтович, Р. Ю. Сукач, О. Р. Воронко
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
м. Львів, Україна

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

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

<https://orcid.org/0009-0008-3104-6825> – О. Р. Воронко

✉ science_ukr@ukr.net

ОСОБЛИВОСТІ ФІЗИЧНОЇ ТА ФІЗІОЛОГІЧНОЇ ПІДГОТОВКИ РЯТУВАЛЬНИКІВ В УМОВАХ ВЕДЕННЯ ОПЕРАТИВНИХ ДІЙ З ГАСІННЯ ПОЖЕЖ ПІД ЧАС ВІЙНИ

Вступ. Стаття присвячена дослідженню особливостей фізичної та фізіологічної підготовки рятувальників у процесі виконання оперативних завдань з гасіння пожеж в умовах воєнного часу. Актуальність дослідження зумовлена трансформацією умов професійної діяльності пожежно-рятувальних підрозділів, що характеризуються підвищеним рівнем небезпеки, руйнуванням інфраструктури та впливом екстремальних чинників, зокрема повторних обстрілів та наявності вибухонебезпечних предметів. У роботі використано загальнонаукові методи пізнання, зокрема аналіз, синтез, узагальнення, порівняння та системний підхід.

Метою статті є наукове обґрунтування особливостей фізичної та фізіологічної підготовки рятувальників, визначення шляхів її адаптації до умов воєнного стану, а також аналіз нормативно-правових засад організації тренувального процесу, спрямованого на забезпечення стійкості та безпеки виконання оперативних завдань.

Результати дослідження свідчать, що фізична та фізіологічна підготовка є взаємопов'язаними та взаємодоповнюваними складовими професійної діяльності рятувальників. Встановлено, що фізична підготовка забезпечує розвиток основних рухових якостей – сили, витривалості, швидкості, координації та гнучкості – шляхом систематичних тренувань, наближених до реальних службових умов. Доведено, що воєнні умови суттєво трансформують систему підготовки, зумовлюючи необхідність інтеграції тактичної готовності з високим рівнем фізіологічної стійкості. Особливого значення набувають процеси кардіореспіраторної, терморегуляційної та нейропсихофізіологічної адаптації, які забезпечують ефективне функціонування організму в умовах дефіциту кисню, високих температур та інтенсивного психологічного навантаження. Встановлено, що сучасна система підготовки базується на поєднанні реальних тренувань із застосуванням вогню та симуляційних методів, що дозволяє мінімізувати ризики при збереженні високого рівня навчального ефекту.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості їх використання для удосконалення програм підготовки пожежно-рятувальних підрозділів у воєнний час.

Ключові слова: фізіологічна підготовка, фізична підготовка, фізіологічна стійкість, рятувальники, війна, пожежогасіння.

D. P. Voytovych, R. Yu. Sukach, O. R. Voronko
Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine

FEATURES OF PHYSICAL AND PHYSIOLOGICAL TRAINING OF RESCUERS IN OPERATIONAL FIREFIGHTING DURING WARTIME

Introduction. The article examines the specific features of physical and physiological training of rescue personnel in the process of performing operational firefighting tasks under wartime conditions. The relevance of the study is обусловлена трансформацією умов професійної діяльності пожежно-рятувальних підрозділів,

which are characterized by an increased level of danger, destruction of infrastructure, and the impact of extreme factors, including repeated shelling and the presence of explosive hazards. The study employs general scientific methods of cognition, including analysis, synthesis, generalization, comparison, and a systems approach.

Purpose. The purpose of the article is to provide a scientific justification of the specific features of physical and physiological training of rescue personnel, to identify ways of adapting it to wartime conditions, and to analyze the regulatory and legal framework for organizing the training process aimed at ensuring the resilience and safety of operational task performance.

Results. The findings indicate that physical and physiological training are interrelated and complementary components of the professional activity of rescue personnel. It has been established that physical training ensures the development of key motor qualities – strength, endurance, speed, coordination, and flexibility – through systematic training closely aligned with real service conditions. The study demonstrates that wartime conditions significantly transform the training system, necessitating the integration of tactical readiness with a high level of physiological resilience. Particular importance is attached to the processes of cardiorespiratory, thermoregulatory, and neuropsychophysiological adaptation, which ensure the effective functioning of the body under conditions of oxygen deficiency, high temperatures, and intense psychological stress. It has been found that the modern training system is based on a combination of real fire-based exercises and simulation methods, which makes it possible to minimize risks while maintaining a high level of training effectiveness.

The practical significance of the results lies in their potential application for improving training programs of fire and rescue units in wartime conditions.

Key words: physiological training, physical training, physiological resilience, rescuers, war, firefighting.

Постановка проблеми. Фізична та фізіологічна підготовка рятувальників посідає ключове місце у формуванні їхньої професійної готовності до виконання оперативних завдань у надзвичайних ситуаціях. Вона охоплює розвиток прикладних рухових якостей та адаптацію організму до дії екстремальних факторів, зокрема теплового стресу, дефіциту кисню, високої інтенсивності роботи у захисному спорядженні. Наукові дослідження G. P. Horn, J. W. Stewart, R. M. Kesler, J. P. DeBlois, S. Kerber, K. W. Fent, W. S. Scott, B. Fernhall, D. L. Smith; M. Liu, K. Zhou, B. Li, Z. Guo, Y. Chen, G. Miao, W. Zhao; M. Sandsund, E. Aamodt, J. Renberg підтверджують, що поєднання високого рівня фізичної працездатності та фізіологічної стійкості є визначальним чинником ефективності й безпеки діяльності пожежно-рятувальних підрозділів в екстремальних умовах [1, 3, 4].

В умовах сучасної війни питання підготовки рятувальників набуває особливої актуальності. Ліквідація пожеж і наслідків руйнувань відбувається на тлі загрози повторних обстрілів, вибухів та дії небезпечних чинників навколишнього середовища. Це потребує інтеграції класичних методів фізичної та спеціальної підготовки з новими підходами до фізіологічного тренування, спрямованими на підвищення стійкості серцево-судинної, дихальної та нервової систем. Таким чином, система підготовки повинна забезпечувати не лише високий рівень професійної майстерності, а й адаптацію організму до екстремальних навантажень, що гарантує збереження життя та ефективність дій у зоні ризику.

Аналіз останніх наукових досліджень і публікацій. Питання фізіологічних та організаційних аспектів діяльності пожежників, зокрема

в екстремальних умовах гасіння пожеж, є достатньо дослідженим як у зарубіжній, так і у вітчизняній науковій літературі. Зарубіжні праці більшою мірою акцентують увагу на фізіологічних реакціях та впливі тренувальних програм на професійну ефективність рятувальників, тоді як українські джерела концентруються на нормативно-правовому забезпеченні, організації службової підготовки та специфіці роботи підрозділів ДСНС в умовах війни.

Значний внесок у вивчення теми зробили такі дослідники, як G. Horn [1], який разом із колегами проаналізував фізіологічні реакції пожежників у різних умовах тренувальних пожеж, що дозволило окреслити ризики для здоров'я під час навчальних заходів. M. Leary [2] розглянув ефективність програм фізичної підготовки, довівши позитивний вплив спеціалізованих тренувань на витривалість та стійкість пожежників до стресових факторів. Схожий напрям підтримали M. Liu [3], які продемонстрували користь комплексних тренувальних програм, спрямованих на підвищення фізичної сили та професійних навичок. Важливим є також дослідження M. Sandsund [4], що зосередилося на теплому навантаженні в екстремальних умовах та особливостях відновлення після інтенсивних навантажень.

Українські автори роблять акцент на специфіці гасіння пожеж у реальних бойових умовах. Зокрема, В. Баланюк [5] з колегами обґрунтували доцільність застосування вогнегасних аерозолів на відкритих електричних підстанціях, що є актуальним у контексті критичної інфраструктури. А. Одинець [16] зі співавторами розробив підходи до оперативних дій при пожежах на складах нафтопродуктів під час бойових дій, що підкреслює практичну значущість дослідження.

Важливе місце у формуванні сучасної системи підготовки займають нормативні документи ДСНС [6, 7, 8], МВС України [9–12], а також методичні матеріали навчально-методичних центрів [13–15], які визначають вимоги до службової підготовки, дій під час воєнного стану та заходи безпеки в екстремальних умовах. Вони забезпечують практичну основу для впровадження результатів наукових досліджень у діяльність рятувальних підрозділів.

Для глибшого висвітлення проблематики використовувалася також експертна література, зокрема сучасні публікації у професійних інтернет-виданнях, які аналізують стан цивільного захисту в умовах воєнних загроз та досвід організації роботи рятувальних служб у міжнародному контексті.

Таким чином, попри наявність значної кількості літератури з цієї проблематики, відчувається нестача систематизованого матеріалу, що поєднував би фізіологічні, організаційні та безпекові аспекти підготовки пожежників. Саме тому із використанням різних методів наукового пізнання було здійснено аналіз, групування та систематизацію інформації, яка подається в контексті теми дослідження.

Мета роботи. Наукове обґрунтування особливостей фізичної та фізіологічної підготовки рятувальників, визначення шляхів її адаптації до умов воєнного часу та аналіз нормативно-правових засад тренувального процесу, що забезпечують стійкість і безпеку виконання оперативних завдань. Основними завданнями дослідження виступають: характеристика особливостей фізичної і фізіологічної підготовки; аналіз їх адаптації в умовах війни; окреслення стандартів тренувань і нормативів, що регламентують підготовку рятувальників.

Методи дослідження. У дослідженні використано комплекс взаємопов'язаних наукових методів, що забезпечили системне вивчення фізичної та фізіологічної підготовки рятувальників в умовах воєнного часу. Зокрема, здійснено аналіз і узагальнення вітчизняних та зарубіжних наукових джерел з метою визначення сучасних підходів до підготовки пожежників, а також нормативно-правових актів України, що регламентують організацію службової та спеціальної підготовки в системі ДСНС. Метод порівняльного аналізу застосовано для зіставлення змісту фізичної та фізіологічної підготовки, тоді як системний підхід дозволив розглядати їх як інтегровану складову професійної готовності. Крім того, використано метод теоретичного моделювання умов оперативної діяльності в зоні бойових дій (високі температури,

задимлення, загроза обстрілів, робота у ЗІЗ), що дало змогу обґрунтувати вимоги до підготовки рятувальників, а також сформулювати напрями її удосконалення.

Виклад основного матеріалу. У науковій літературі [2–3] описується, що фізична й фізіологічна підготовка є взаємопов'язаними складовими професійної готовності рятувальників до ведення оперативних дій під час пожеж, особливо в умовах екстремальних навантажень війни.

Фізична підготовка спрямована на розвиток сили, витривалості, гнучкості, швидкості та потужності. Вона реалізується через систематичні тренувальні програми (наприклад, силові вправи, пліометрія, функціональні рухові комплекси), які відтворюють службові дії рятувальників. Як свідчать результати Liu et al. [3], ефективність досягається при використанні комплексного підходу (силові + вибухові вправи), що дозволяє підвищити здатність виконувати навантаження, подібні до умов гасіння пожежі: підйом по канату, перенесення важких предметів, швидкісні переміщення у спорядженні.

Фізіологічна підготовка охоплює процеси, які забезпечують стійкість організму до екстремальних факторів: теплового стресу, обмеженого доступу кисню, високої інтенсивності роботи в захисному спорядженні. На відміну від фізичної підготовки, вона акцентує увагу не лише на розвитку рухових якостей, але й на адаптації серцево-судинної, дихальної, терморегуляторної та нейром'язової систем до умов професійної діяльності. Як підкреслює Leary M. [2], саме недостатня фізіологічна адаптація, зокрема високий рівень серцево-судинних ризиків, є головною причиною смертності серед пожежників. Тому регулярні кардіотренування, контроль біомаркерів здоров'я та профілактика перевантажень становлять ядро цієї підготовки (табл. 1).

Ключовим компонентом тренувального процесу у міжнародній практиці [1–4] є відтворення умов, максимально наближених до реальних пожежних сценаріїв. Дослідження показують, що використання повного бойового спорядження, включно із засобами індивідуального захисту органів дихання, суттєво підвищує фізіологічне навантаження на організм: спостерігається максимальне або наближене до максимального зростання частоти серцевих скорочень, підвищення температури тіла, а також значне навантаження на дихальну систему. Водночас акцент робиться на різних підходах до моделювання тренувальних умов: від проведення занять у спеціалізованих полігонах з підвищеною температурою до застосування симуляційних технологій, які дозволяють

Порівняльна характеристика фізичної та фізіологічної підготовки

Ознака	Фізична підготовка	Фізіологічна підготовка
Основна мета	Розвиток сили, витривалості, швидкості, координації, гнучкості	Адаптація організму до екстремальних фізичних і середовищних навантажень
Фокус	Вдосконалення рухових якостей через тренування	Підвищення функціональної стійкості серцево-судинної, дихальної та нейро-м'язової систем
Методи	Силові вправи, пліометрія, функціонально-рухові комплекси, моделювання службових завдань	Кардіотренування, контроль ЧСС, тренування у спецпорядженні, моніторинг адаптивних реакцій
Кінцевий результат	Підвищення фізичної працездатності й готовності до виконання оперативних завдань	Зменшення ризику серцево-судинних подій, підвищення стресостійкості, забезпечення безпеки при тривалих навантаженнях

Примітка: систематизовано авторами на основі джерел [2–3]

знизити теплове та кардіоваскулярне навантаження, але зберегти навчальний ефект [1].

Сучасні дослідження вказують, що важливим завданням є баланс між безпекою та реалістичністю навчальних умов: з одного боку, тренування у високотемпературних середовищах дають пожежникам необхідний досвід для адаптації до теплового стресу, з іншого – вони підвищують ризик травматизму та серцево-судинних ускладнень. Зокрема, експериментальні дані свідчать, що під час моделювання задимлення у надвисоких температурах (110–272 °C) у пожежників відбувається суттєве зростання фізіологічного навантаження: частота серцевих скорочень підвищується з 92 ± 14 до $185\text{--}190$ уд/хв, а температура тіла – з $37,5 \pm 0,3$ °C до $39,6 \pm 0,5$ °C, причому максимальні значення досягаються вже у фазі відновлення після роботи [4]. Також встановлено, що навіть короткочасне (≈ 15 хв) перебування у зоні високих температур супроводжується приростом температури тіла на $0,9\text{--}1,2$ °C та досягненням субмаксимальних або максимальних кардіоваскулярних навантажень, що створює передумови для розвитку теплового стресу та серцево-судинних ускладнень [4].

Тому міжнародна практика поєднує як «живі» тренування з реальним вогнем, так і симуляційні підходи з використанням спеціальних технологій задимлення та візуалізації полум'я. Такий підхід дозволяє варіювати фізіологічне навантаження, контролювати тепловий стрес і водночас забезпечувати формування необхідних професійних навичок [4].

Фізіологічна підготовка рятувальників в Україні охоплює низку ключових напрямів, які формують основу їхньої стійкості до екстремальних умов професійної діяльності. Вона включає кардіореспіраторну адаптацію, що забезпечує розвиток витривалості, профілактику гіпертензії та ішемічних подій, терморегуляційну стійкість, яка дозволяє організму витримувати роботу у високотемпературному середовищі та у важкому спорядженні,

а також м'язово-скелетну стабільність, спрямовану на профілактику травм та зміцнення опорно-рухового апарату. Окреме місце займає нейропсихофізіологічна регуляція, що формує здатність рятувальника протидіяти стресу та швидко відновлюватися після надмірних навантажень. Сукупність цих компонентів створює фундамент для безпечного та ефективного виконання службових обов'язків, тоді як фізична підготовка здебільшого забезпечує розвиток прикладних рухових можливостей, необхідних у реальних умовах бойового чергування [2].

Ключові параметри фізіологічної підготовки зосереджені на підвищенні серцево-судинної стійкості, що знижує ризик інфарктів та аритмій, покращенні дихальної ефективності, яка дозволяє ефективно працювати навіть при обмеженому надходженні кисню, а також на оптимізації терморегуляційних механізмів, що сприяють адаптації до перегріву та роботи у захисному спорядженні [3].

В умовах воєнного стану діяльність пожежно-рятувальних підрозділів характеризується суттєвим ускладненням оперативної обстановки, що безпосередньо впливає на вимоги до фізичної та фізіологічної підготовки особового складу. Зокрема, ліквідація пожеж здійснюється за умов постійної загрози повторних обстрілів, наявності вибухонебезпечних предметів і значних руйнувань інфраструктури, що зумовлює підвищений рівень психофізичного напруження, необхідність швидкого переміщення, роботи в обмеженому часі та виконання завдань у стані хронічного стресу. Такі умови потребують розвитку високого рівня витривалості, швидкісно-силових якостей, стійкості до теплового та емоційного навантаження, а також здатності організму ефективно функціонувати в екстремальних середовищах.

Дослідження А. Одинця [16] показує, що під час гасіння пожеж на складах нафтопродуктів, спричинених ракетно-артилерійськими обстрілами, рятувальники стикаються з необхідністю приймати рішення не лише з урахуванням пожежної

обстановки, але й залежно від оперативної інформації від Збройних Сил України, правоохоронних органів та територіальної оборони щодо можливих повторних атак. Тому до місця пожежі першочергово скеровуються розвідувальні групи, а основні сили вводяться лише після оцінки ризиків. Організація гасіння супроводжується постійним контролем загрози обстрілів, облаштуванням укриттів для особового складу та дотриманням безпечних дистанцій між пожежними автомобілями. В окремих випадках гасіння взагалі не проводиться через надмірну небезпеку, а дії обмежуються локалізацією пожежі або контрольованим вигоранням розлитих нафтопродуктів [16].

Іншою важливою особливістю діяльності рятувальників у воєнних умовах є необхідність підготовки особового складу до застосування сучасних та мобільних методів пожежогасіння на об'єктах критичної інфраструктури. Як зазначають В. Баланюк та співавтори [5], традиційні системи протипожежного захисту часто втрачають ефективність унаслідок пошкодження інфраструктури або відключення енергопостачання, що зумовлює потребу використання альтернативних засобів гасіння. У зв'язку з цим фізична та спеціальна підготовка рятувальників повинна передбачати оволодіння навичками роботи з мобільними

засобами, такими як компактні струмені з додаванням вогнегасних емульсій та аерозольні системи. Застосування таких технологій вимагає високого рівня координації рухів, швидкості прийняття рішень та здатності ефективно діяти в умовах підвищеного ризику, що безпосередньо обумовлює необхідність розвитку відповідних фізичних та психофізіологічних якостей у процесі підготовки рятувальників [5].

З огляду на ці реалії, фізіологічна підготовка рятувальників набуває особливої значущості. Вона не лише забезпечує адаптацію до екстремальних навантажень, але й формує здатність швидко відновлюватися після дії стресових чинників, витримувати роботу в умовах високих температур, кисневого дефіциту та постійної небезпеки повторних атак. Підвищення серцево-судинної та психофізіологічної стійкості стає критично важливим для виконання завдань у зоні бойових дій, де фізичне виснаження або навіть короткочасна втрата працездатності може коштувати життя не лише самому рятувальнику, але й його колегам та цивільному населенню. Відповідно, працівники пожежної служби проходять фізіологічні тести та нормативи для того, щоб довести свою придатність (табл. 2).

У воєнних умовах фізична підготовка пожежників в Україні формалізована як елемент

Таблиця 2

Фізіологічні тести, нормативи/моделювання та особливості, що вивчаються (у межах українських актів)

Фізіологічні тести (що вимірюється/фіксується)	Нормативи і моделювання (джерело, інструменти)	Особливості, що вивчаються
Облік фактичного часу перебування ланки в непридатному для дихання середовищі; контроль використання повітря; реєстрація входу/виходу ланки	Порядок № 780: облікова таблиця перебування, електронний планшет поста безпеки; протокол випробувань ЗІЗОД; журнали ТО балонів/масок/компресорів; тренування і дії в екстремальних температурах, задимленні й забрудненнях	Толерантність до теплового та дихального стресу у ЗІЗ; дисципліна ротації; управління запасом повітря і безпечними рубежами роботи ланки
Періодичні заліки/контроль службової підготовки, включно зі спецправами в ЗІЗ (у межах річних планів)	Порядок службової підготовки № 511 (зі змінами № 480): планування, облік, контроль знань і навичок; включення фізичної та спеціальної підготовки до річних розділів занять	Підтримання кардіореспіраторної й силової працездатності; інтеграція фізичних навичок з тактичними діями підрозділів
Допуск до роботи у складі ГДЗС; контроль готовності ланки і поста безпеки; фіксація параметрів роботи	Положення про ГДЗС № 870: завдання, організація, повноваження, побудова ланок; навчально-тренувальна діяльність ГДЗС	Орієнтування в задимленні, взаємодія у ланці, виконання аварійних процедур під навантаженням у ЗІЗ
Визначення безпечної тривалості роботи під тепловим випромінюванням; регламентована заміна ствольників; інструктажі щодо сигналів екстреної евакуації	«Дії підрозділів ДСНС у воєнному стані»: вимога до ЗІЗ протитеплового захисту, сигнали на відхід/укриття, ротація особового складу; оцінка теплового потоку (актинометри)	Стійкість до перегріву, керування відновленням і ротацією в умовах обстрілів; безпечне ведення пінної атаки/охолодження резервуарів
Практичні відпрацювання на об'єктах: дії при загрозі/виникненні пожежі, застосування первинних засобів у ЗІЗ, маршрути евакуації	Типова програма прискореної підготовки НМЦ ЦЗ [14], тема 11; сценарні тренування НМЦ ЦЗ та методичні рекомендації з проведення об'єктових тренувань	Моторні навички в ЗІЗ; стрес-толерантність через сценарне моделювання; узгодження дій із сигналами оповіщення та безпечними маршрутами

службової та спеціальної (газодимозахисної) підготовки і безпосередньо «защита» у правовій процедури планування занять, моделювання небезпечних середовищ та контролю фізіологічного навантаження під час тренувань і оперативної роботи. Нормативну рамку становлять: Порядок організації службової підготовки (затверджений наказом МВС № 511 від 15.06.2017 із чинними змінами № 480 від 12.06.2023), який визначає вимоги до структури, обліку й контролю підготовки в органах і підрозділах ДСНС; спеціальний Порядок організації роботи підрозділів під час підготовки і дій у непридатному для дихання середовищі (наказ МВС № 780 від 25.09.2023), що задає практичні механізми тренувань у задимленні, високих температурах і забрудненнях; та Положення про газодимозахисну службу (наказ ДСНС № 870 від 31.10.2023), яке регламентує допуск, побудову ланок, роботу поста безпеки і навчально-тренувальний цикл ГДЗС. На рівні прикладної тактики воєнного часу ключові алгоритми ротації ствольників, використання індивідуального протитеплого захисту, організації сигналів на екстрену евакуацію та визначення безпечних рубежів тимчасового відходу кодифіковані в узагальненому посібнику «Дії підрозділів ДСНС України в умовах воєнного стану». Саме ці документи роблять «кардіотренування у ЗІЗ» повсякденною нормою: тренування та навчання проводяться в умовах, що навмисно відтворюють екстремальні температури, задимлення та загазованість; облік перебування ланки в непридатному для дихання середовищі ведеться за встановленими формами, а випробування та технічне обслуговування ЗІЗОД (апаратів на стисненому повітрі, масок, балонів, компресорів) оформлюються протоколами й журналами – це не лише технічний контроль, а й інструмент моніторингу фактичного фізіологічного навантаження, від якого залежить тривалість робочих циклів і рішення про ротацію.

Коли навчання проводять на об'єктах, «прискорені» програми НМЦ ЦЗ [14] та методичні рекомендації ДСНС задають сценарне моделювання пожеж і обстрілів, включно з практикою застосування первинних засобів гасіння у ЗІЗ, маршрутизацією евакуації та інструктажами щодо сигналів і безпечних відстаней; у підсумку формується і моторна, і стрес-толерантна компонента фізіологічної готовності. Сукупно це забезпечує тріаду: стандартизовані «фізіологічні тести» (через облік часу та умов роботи ланки, контроль повітря і теплового впливу), нормативне моделювання кардіореспіраторного навантаження у засобах захисту та регламентовану ротацію/відновлення, необхідні для стійкої працездатності під обстрілами [9–15].

Таким чином, на відміну від наявних підходів, у дослідженні запропоновано комплексне трактування фізичної та фізіологічної підготовки рятувальників саме в умовах воєнних дій як єдиної інтегрованої системи, що поєднує розвиток рухових якостей із цілеспрямованою адаптацією організму до бойових ризиків. Новизна підходу полягає у поєднанні трьох ключових складових: (1) моделювання екстремальних умов не лише пожежного, але й бойового середовища (загроза обстрілів, обмежений час, необхідність укриття), (2) інтеграції фізіологічного моніторингу (теплове навантаження, ЧСС, тривалість роботи у ЗІЗОД) у процес прийняття тактичних рішень і ротації особового складу, а також (3) поєднання традиційної фізичної підготовки з нейропсихофізіологічною стійкістю до хронічного стресу. Запропонований підхід дозволяє розглядати підготовку рятувальників не лише як тренувальний процес, а як систему забезпечення їхньої безпеки та функціональної надійності в умовах високої невизначеності та комбінованих загроз, характерних для воєнного часу.

Висновки. У процесі дослідження досягнуто поставленої мети – науково обґрунтовано сутність і зміст фізичної та фізіологічної підготовки рятувальників як інтегрованої системи забезпечення їхньої професійної готовності до виконання оперативних дій в умовах війни. Узагальнення результатів сучасних наукових досліджень дозволило встановити, що ефективність діяльності пожежно-рятувальних підрозділів визначається не лише рівнем розвитку фізичних якостей, а й ступенем адаптації організму до екстремальних факторів середовища, зокрема теплового стресу, високих кардіоваскулярних навантажень і дефіциту кисню. При цьому нормативно-правові документи України формують організаційно-методичну основу підготовки, регламентуючи проведення тренувань у засобах індивідуального захисту, контроль фізіологічного навантаження та порядок допуску особового складу до роботи в небезпечних умовах.

Встановлено, що в умовах воєнного часу фізична та фізіологічна підготовка повинна адаптуватися до нових типів навантажень, зумовлених загрозою обстрілів, необхідністю швидкої евакуації, обмеженістю часу на виконання завдань та підвищеним психоемоційним напруженням. Основними шляхами такої адаптації є: підвищення рівня кардіореспіраторної витривалості та теплової стійкості організму; розвиток швидкісно-силових якостей для дій у динамічних і небезпечних умовах; формування нейропсихофізіологічної стійкості до стресу; а також удосконалення

навичок роботи в засобах індивідуального захисту в умовах задимлення, високих температур і обмеженого простору.

На основі аналізу наукових джерел і нормативної бази запропоновано удосконалений підхід до підготовки рятувальників, який передбачає: поєднання фізичних тренувань із фізіологічним моніторингом (контроль частоти серцевих скорочень, теплового навантаження, тривалості роботи у ЗІЗОД); впровадження сценарно-орієнтованих тренувань, що моделюють умови бойових дій (загроза повторних обстрілів, необхідність укриття та ротації); використання комбінованих тренувальних методів (реальні теплові полігони та безпечні симуляційні технології); а також інтеграцію елементів психофізіологічної підготовки для підвищення стресостійкості та здатності до швидкого відновлення.

Таким чином, запропонована система фізичної та фізіологічної підготовки дозволяє підвищити функціональну надійність, безпеку та ефективність діяльності рятувальників у складних умовах воєнного часу, забезпечуючи їхню готовність до виконання завдань в умовах комбінованих ризиків та високої інтенсивності навантажень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Horn G. P., Stewart J. W., Kesler R. M., DeBlois J. P., Kerber S., Fent K. W., Scott W. S., Fernhall B., Smith D. L. Firefighter and fire instructor's physiological responses and safety in various training fire environments. *Safety Science*, 2019, 116, 287-294. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.03.017>
2. Leary M., Thomas J., Hayes R., Sherlock L. Evaluation of an Occupational Exercise Training Program for Firefighters: Mixed Methods Pilot Study. *JMIR Form Res*, 2020, 4(9), e17835. DOI: <https://doi.org/10.2196/17835>
3. Liu M., Zhou K., Li B., Guo Z., Chen Y., Miao G., Zhao W. Effect of 12 weeks of complex training on occupational activities, strength, and power in professional firefighters. *Frontiers in Physiology*, 2022, 13, 962546. DOI: <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.962546>
4. Sandsund M., Aamodt E., Renberg J. Heat strain in professional firefighters: Physiological responses to a simulated smoke dive in extremely hot environments and the subsequent recovery phase. *Industrial Health*, 2024, 62(5), 333-345. DOI: <https://doi.org/10.2486/indhealth.2023-0151>
5. Баланюк В., Мирошкін В., Гузар Н., Гарасимюк О., Копистинський Я. Підвищення ефективності гасіння пожеж на відкритих електричних підстанціях шляхом використання вогнегасних аерозолів. *Пожежна безпека*, 2023, № 43, 13–20. DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.43.2023.02>
6. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. (2022). Дії підрозділів ДСНС України в умовах воєнного стану (узагальнений посібник). URL: <https://dsns.gov.ua/upload/1/9/2/4/3/5/9/diyi-dsns-objednana-kniga-compressed.pdf>
7. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. (2023, 31 жовтня). Положення про газодимозахисну службу ДСНС України (Наказ ДСНС № 870). URL: <https://if.dsns.gov.ua/upload/1/9/6/6/5/7/4/polozenia-pro-gdzs-870.pdf>
8. Коваль М. Дії підрозділів ДСНС України в умовах воєнного стану (узагальнений посібник, розділи щодо гасіння пожеж під обстрілами, заходи безпеки, підготовка персоналу). Державна служба України з надзвичайних ситуацій. URL: <https://dsns.gov.ua/upload/1/9/2/4/3/5/9/diyi-dsns-objednana-kniga-compressed.pdf>
9. Міністерство внутрішніх справ України. (2017, 15 червня). Про затвердження Порядку організації службової підготовки осіб рядового і начальницького складу служби цивільного захисту (Наказ МВС № 511) [чинний із змінами наказу МВС № 480 від 12.06.2023]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0835-17>
10. Міністерство внутрішніх справ України. (2023, 25 вересня). Про затвердження Порядку організації роботи органів управління та підрозділів, закладів освіти системи ДСНС під час підготовки особового складу, гасіння пожеж, ліквідації наслідків НС та інших небезпечних подій в умовах екстремальних температур, задимленості, загазованості, радіоактивного, хімічного забруднення та біологічного зараження (Наказ МВС № 780). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z1839-23>
11. Міністерство внутрішніх справ України. Про затвердження Змін до Порядку організації службової підготовки... (Наказ МВС № 480 від 12.06.2023) – зокрема, доповнення щодо фізичної підготовки. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z1186-23>
12. Міністерство внутрішніх справ України. Про затвердження Порядку організації службової підготовки осіб рядового і начальницького складу служби цивільного захисту (Наказ МВС № 511 від 15.06.2017; чинна редакція з урахуванням змін). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0835-17>
13. Навчально-методичний центр ЦЗ та БЖД ДСНС України. (2024). Типова програма прискореної підготовки працівників до дій в особливий період (Чабани). URL: <https://nmc.dsns.gov.ua/upload/4/5/0/7/5/programa-priskorenoyi-pidgotovki-2024.pdf>
14. Навчально-методичний центр ЦЗ та БЖД ДСНС України. Типова програма прискореної підготовки працівників до дій в особливий період (рекомендована до впровадження на підприємствах/установах; використовується і в системі ЦЗ для воєнного часу). Чабани, 2024. URL: <https://nmc.dsns.gov.ua/upload/4/5/0/7/5/programa-priskorenoyi-pidgotovki-2024.pdf>

15. НМЦ ЦЗ та БЖД ДСНС України. (2022). Методичні рекомендації щодо підготовки та проведення об'єктового тренування з питань цивільного захисту. URL: <https://nmc.dsns.gov.ua/upload/4/4/7/6/1/metodrekom-trenuvch-14062022.pdf>

16. Одинець А., Ніжник В., Сізіков О., Фещук Ю., Балло Я., Климась Р., Жихарев О. Обґрунтування додаткових заходів щодо оперативних дій під час гасіння пожеж на складах нафтопродуктів в умовах бойових дій. *Науковий вісник: цивільний захист та пожежна безпека*, 2022, № 1, 72–79. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/sbcps_2022_1_10

REFERENCES

1. Horn, G. P., Stewart, J. W., Kesler, R. M., DeBlois, J. P., Kerber, S., Fent, K. W., Scott, W. S., Fernhall, B., & Smith, D. L. (2019). Firefighter and fire instructor's physiological responses and safety in various training fire environments. *Safety Science*, 116, 287–294. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.03.017>

2. Leary, M., Thomas, J., Hayes, R., & Sherlock, L. (2020). Evaluation of an occupational exercise training program for firefighters: Mixed methods pilot study. *JMIR Formative Research*, 4(9), e17835. <https://doi.org/10.2196/17835>

3. Liu, M., Zhou, K., Li, B., Guo, Z., Chen, Y., Miao, G., & Zhao, W. (2022). Effect of 12 weeks of complex training on occupational activities, strength, and power in professional firefighters. *Frontiers in Physiology*, 13, 962546. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.962546>

4. Sandsund, M., Aamodt, E., & Renberg, J. (2024). Heat strain in professional firefighters: Physiological responses to a simulated smoke dive in extremely hot environments and the subsequent recovery phase. *Industrial Health*, 62(5), 333–345. <https://doi.org/10.2486/indhealth.2023-0151>

5. Balaniuk, V., Myroshkin, V., Huzar, N., Harasymuk, O., & Kopystynskyi, Ya. (2023). Pidvyshchennia efektyvnosti hasinnia pozhezh na vidkrytykh elektrychnykh pidstantsiakh shliakhom vykorystannia vohnehasnykh aeroliziv [Improving the efficiency of fire extinguishing at open electrical substations by using fire-extinguishing aerosols]. *Pozhezhna bezpeka*, 43, 13–20. <https://doi.org/10.32447/20786662.43.2023.02> [in Ukrainian].

6. Derzhavna sluzhba Ukrainy z nadzvychainykh sytuatsii. (2022). Dii pidrozdiliv DSNS Ukrainy v umovakh voiennoho stanu (uzahalnenyi posibnyk) [Actions of SES units of Ukraine under martial law (general manual)]. Retrieved from: <https://dsns.gov.ua/upload/1/9/2/4/3/5/9/diyi-dsns-objednana-kniga-compressed.pdf> [in Ukrainian].

7. Derzhavna sluzhba Ukrainy z nadzvychainykh sytuatsii. (2023, October 31). Polozhennia pro hazodymozakhysnu sluzhbu DSNS Ukrainy (Nakaz DSNS № 870) [Regulation on the gas and smoke protection service of SES of Ukraine (Order No. 870)]. Retrieved from: <https://if.dsns.gov.ua/upload/1/9/6/6/5/7/4/polozhennia-pro-gdzs-870.pdf> [in Ukrainian].

8. Koval, M. (2022). Dii pidrozdiliv DSNS Ukrainy v umovakh voiennoho stanu (uzahalnenyi posibnyk, rozdil shchodo hasinnia pozhezh pid obstrilamy, zakhody bezpeky, pidhotovka personalu) [Actions of SES units of Ukraine under martial law (general manual, sections on fire extinguishing under shelling, safety measures, personnel training)]. *Derzhavna sluzhba Ukrainy z nadzvychainykh sytuatsii*. Retrieved from: <https://dsns.gov.ua/upload/1/9/2/4/3/5/9/diyi-dsns-objednana-kniga-compressed.pdf> [in Ukrainian].

9. Ministerstvo vnutrishnikh sprav Ukrainy. (2017, June 15). Pro zatverdzhennia Poriadku orhanizatsii sluzhbovoi pidhotovky osib riadovoho i nachalnytskoho skladu sluzhby tsyvilnoho zakhystu (Nakaz MVS № 511) [On approval of the procedure for the organization of official training of civil protection personnel (Order No. 511)] (valid with amendments by Order No. 480 of 12.06.2023). Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0835-17> [in Ukrainian].

10. Ministerstvo vnutrishnikh sprav Ukrainy. (2023, September 25). Pro zatverdzhennia Poriadku orhanizatsii roboty orhaniv upravlinnia ta pidrozdiliv, zakladiv osvity systemy DSNS... (Nakaz MVS № 780) [On approval of the procedure for the organization of work of management bodies and SES units... (Order No. 780)]. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z1839-23> [in Ukrainian].

11. Ministerstvo vnutrishnikh sprav Ukrainy. (2023, June 12). Pro zatverdzhennia Zmin do Poriadku orhanizatsii sluzhbovoi pidhotovky... (Nakaz MVS № 480) [On approval of amendments to the procedure of official training (Order No. 480)]. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z1186-23> [in Ukrainian].

12. Ministerstvo vnutrishnikh sprav Ukrainy. (2017). Pro zatverdzhennia Poriadku orhanizatsii sluzhbovoi pidhotovky osib riadovoho i nachalnytskoho skladu sluzhby tsyvilnoho zakhystu (Nakaz MVS № 511; chynna redaktsiia) [On approval of the procedure for the organization of official training of civil protection personnel (Order No. 511; current edition)]. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0835-17> [in Ukrainian].

13. Navchalno-metodychni tsestr CZ ta BZhD DSNS Ukrainy. (2024). Typova prohrama pryskorenoi pidhotovky pratsivnykiv do dii v osoblyvyi period (Chabany) [Standard accelerated training program for employees' actions in a special period (Chabany)]. Retrieved from: <https://nmc.dsns.gov.ua/upload/4/5/0/7/5/programa-priskorenoyi-pidgotovki-2024.pdf> [in Ukrainian].

14. Navchalno-metodychni tsestr CZ ta BZhD DSNS Ukrainy. (2024). Typova prohrama pryskorenoi pidhotovky pratsivnykiv do dii v osoblyvyi period (rekomendovana do vprovadzhennia na pidpriemstvakh; vykorystovuietsia i v systemi CZ dlia voiennoho chasu) [Standard accelerated training program for employees' actions in a special period (recommended for enterprises; also used in the civil protection system for wartime)]. Retrieved from: <https://nmc.dsns.gov.ua/upload/4/5/0/7/5/programa-priskorenoyi-pidgotovki-2024.pdf> [in Ukrainian].

15. NMTs CZ ta BZhD DSNS Ukrainy. (2022). Metodichni rekomendatsii shchodo pidhotovky ta provedennia ob'iektovoho trenuvannia z pytan tsyvilnoho zakhystu [Methodical recommendations for preparing and conducting facility training on civil protection]. Retrieved from: <https://nmc.dsns.gov.ua/upload/4/4/7/6/1/metodrekom-trenuvcz-14062022.pdf> [in Ukrainian].

16. Odynets, A., Nizhnyk, V., Sizikov, O., Feshchuk, Yu., Ballo, Ya., Klymas, R., & Zhykhar-

iev, O. (2022). Obgruntuvannia dodatkovykh zakhodiv shchodo operatyvnykh dii pid chas hasinnia pozhezh na skladakh naftoproduktiv v umovakh boiovykh dii [Justification of additional measures for firefighting operations at oil product warehouses under combat conditions]. *Naukovyi visnyk: tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, 1, 72–79. Retrieved from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/sbcdfs_2022_1_10 [in Ukrainian].

© Д. П. Войтович, Р. Ю. Сукач, О. Р. Воронко

Оглядова стаття

Дата першого надходження статті до видання: 12.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 05.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.48.2026.03>

Н. В. Жезло-Хлевна, О. В. Хлевной, О. О. Карабин, Ю. С. Назар, В. М. Пилипенко

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна

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

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

<https://orcid.org/0000-0002-9287-376X> – О. О. Карабин

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

<https://orcid.org/0009-0008-5957-4822> – В. М. Пилипенко

✉ olexandr.khlevnoy@gmail.com

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕНЕРГОЗАТРАТ ОСІБ З ПРОТЕЗАМИ В КОНТЕКСТІ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕВАКУАЦІЇ ПРИ ПОЖЕЖІ

Проблема. Зростання кількості осіб із ампутаціями нижніх кінцівок в Україні внаслідок бойових дій актуалізує проблему забезпечення їх безпечної евакуації під час пожеж та інших надзвичайних ситуацій. Особи з протезами характеризуються підвищеними енергетичними витратами при пересуванні, що обумовлено біомеханічними особливостями руху, додатковими втратами енергії та зниженням ефективності м'язової роботи. Водночас у сучасних дослідженнях недостатньо уваги приділено кількісному оцінюванню енергозатрат як ключового чинника, що визначає витривалість і здатність до успішної евакуації.

Метою статті є розроблення математичної моделі енергозатрат осіб із протезами нижніх кінцівок у процесі евакуації при пожежі з урахуванням типу протезування, параметрів руху та характеристик евакуаційного маршруту.

Методи досліджень. У роботі використано аналітичні методи математичного моделювання, що базуються на поєднанні механічних складових руху (кінетичної та потенційної енергії) з урахуванням дисипативних втрат та метаболічних коефіцієнтів. Проведено чисельне моделювання різних сценаріїв евакуації (горизонтальний рух, підйом і спуск сходами) із використанням програмної реалізації на Python. Виконано порівняльний аналіз енергозатрат для осіб без ампутацій, а також користувачів протезів гомілки та стегна.

Результати. Розроблена модель дозволила описати лінійне зростання енергозатрат зі збільшенням довжини маршруту для всіх типів руху, при цьому їх величина суттєво залежить від типу ділянки. Найбільші витрати енергії спостерігаються при русі сходами вгору, що обумовлено виконанням роботи проти сили тяжіння. Для осіб із протезами зафіксовано систематичне перевищення енергозатрат у порівнянні зі здоровими особами, причому найбільш виражений ефект характерний для протезів стегна. Встановлено, що швидкість руху суттєво впливає на енергозатрати при горизонтальному переміщенні, тоді як при русі сходами її вплив є обмеженим.

Висновки. Запропонована математична модель є адекватним інструментом оцінювання енергетичної складності маршрутів евакуації для осіб із протезами та може бути використана при проектуванні безпечних евакуаційних шляхів. Встановлено, що врахування енергозатрат дозволяє більш обґрунтовано оцінювати можливості маломобільних груп населення в умовах пожежі. Перспективним напрямом подальших досліджень є урахування ефекту накопичення втоми, який має суттєвий вплив на ефективність евакуації осіб із протезами навіть на відносно коротких дистанціях.

Ключові слова: евакуація, енергозатрати, протези нижніх кінцівок, біомеханіка, пожежна безпека, математичне моделювання, комп'ютерне моделювання

MATHEMATICAL MODEL OF ENERGY EXPENDITURE OF PERSONS WITH PROSTHESES IN THE CONTEXT OF FIRE EVACUATION OPTIMIZATION

Problem. The increase in the number of individuals with lower limb amputations in Ukraine due to military actions highlights the need to ensure safe evacuation during fires and other emergencies. Persons with prostheses are characterized by increased energy expenditure during movement, caused by biomechanical features, additional energy losses, and reduced efficiency of muscular work. At the same time, current research lacks sufficient attention to the quantitative assessment of energy expenditure as a key factor determining endurance and the ability to complete evacuation.

Purpose. The aim of this study is to develop a mathematical model of energy expenditure for persons with lower limb prostheses during fire evacuation, taking into account the type of prosthesis, movement parameters, and characteristics of evacuation routes.

Methods. The study employs analytical methods of mathematical modeling based on the combination of mechanical components of motion (kinetic and potential energy) with consideration of dissipative losses and metabolic coefficients. Numerical simulations of various evacuation scenarios (horizontal movement, stair ascent and descent) were performed using a Python-based implementation. A comparative analysis of energy expenditure was conducted for able-bodied individuals and users of transtibial and transfemoral prostheses.

Results. The developed model demonstrates that energy expenditure increases linearly with the length of the evacuation route for all types of movement, while its magnitude significantly depends on the type of terrain. The highest energy costs are observed during stair ascent due to the necessity of performing work against gravity. Persons with prostheses exhibit consistently higher energy expenditure compared to able-bodied individuals, with the most pronounced effect observed for transfemoral prostheses. It is also established that movement speed significantly affects energy expenditure during horizontal motion, whereas its influence is limited in stair movement scenarios.

Conclusions. The proposed mathematical model is an adequate tool for assessing the energy complexity of evacuation routes for persons with prostheses and can be applied in the design of safe evacuation pathways. Considering energy expenditure allows for a more accurate assessment of the capabilities of mobility-impaired individuals during fire emergencies. A promising direction for future research is the incorporation of fatigue accumulation effects, which significantly influence evacuation performance for prosthesis users even over relatively short distances.

Key words: evacuation, energy expenditure, lower limb prostheses, biomechanics, fire safety, mathematical modeling, computer simulation

Постановка проблеми. Актуальність проблеми евакуації осіб з протезами нижніх кінцівок під час пожежі зумовлена стрімким зростанням кількості людей з ампутаціями внаслідок військових дій, травматизму та судинних захворювань, а також недостатньою адаптацією чинних норм пожежної безпеки до їхніх біомеханічних та метаболічних особливостей [1, 2]. Чинні документи [3, 4] не передбачають обґрунтованих варіантів врахування підвищених енергозатрат, асиметрії ходи, обмеженої пропріоцепції та швидкого настання втоми у користувачів модульних і біонічних протезів, що призводить до суттєвих помилок при розрахунках тривалості евакуації.

Головне наукове протиріччя полягає у відсутності інтегрованих кількісних моделей, здатних поєднати розрахунок енергозатрат при русі горизонтальними ділянками та сходами з подальшим прогнозуванням динаміки акумуляції втоми саме для осіб з протезами нижніх кінцівок. Класичні моделі розроблені для здорових людей

і не враховують додаткову дисипацію в штучних суглобах, інерцію протеза, компенсаторну роботу м'язів-стабілізаторів та вплив рівня ампутації (транстібіальна, трансфеморальна, однобічна/двобічна).

Це обумовлює потребу в розробці спеціалізованої математичної моделі енергозатрат, яка в перспективі дозволить кількісно прогнозувати критичний час настання втоми і оптимізувати евакуаційні маршрути в будівлях для осіб з протезами нижніх кінцівок.

Аналіз досліджень і публікацій. Сучасні математичні моделі енергозатрат при ходьбі розроблені переважно для здорових осіб і не враховують біомеханічні особливості користувачів протезів нижніх кінцівок. Класичні підходи [5] дозволяють прогнозувати метаболічні витрати під час повільного ходіння з навантаженням, беручи до уваги масу тіла, швидкість та зовнішнє навантаження. У роботі [6] детально вивчені енергетичні затрати ходьби та бігу на екстремальних ухилах, що особливо актуально для

подолання сходів. Дослідження [7] містять фундаментальні принципи біомеханіки та енергетики м'язової роботи, які й досі використовуються як базис для розрахунку потенційної та кінетичної енергії. Проте ці моделі припускають симетричну ходу, відсутність додаткової інерції штучних сегментів та нульову дисипацію в суглобах, що кардинально відрізняється від реальності для осіб з ампутаціями. Так, зокрема, дослідження [8] продемонстрували, що у осіб з травматичними ампутаціями нижніх кінцівок енергозатрати на амбулаторну активність зростають на 25–60 % порівняно з нормою, а стандартні акселерометричні алгоритми (наприклад, Actiheart) дають похибку до 45 %. Окрім цього в роботі [9] доведено, що навіть спроба вирівняти інерційні характеристики протеза з інтактною кінцівкою призводять до зростання асиметрії ходи та підвищення енергозатрат на 6–7 %.

Специфічні математичні моделі для опису ходи осіб з протезами нижніх кінцівок запропоновані у низці наукових робіт. Наприклад, у [10] автори проаналізували вплив роботи протезованої стопи на загальний метаболічний рівень та встановили, що підвищення енергії під час відштовхування зменшує загальні метаболічні витрати, але не завжди знижує енергетичні втрати при контакті з опорою. Дослідження [11] підтверджує, що енергозатрати при транстібіальній ампутації залежать від типу стопи протеза та швидкості.

У роботах, що торкаються теми евакуації при пожежі моделі переважно враховують знижену мобільність осіб з інвалідністю. У дослідженні [12] автори розробили агент-орієнтовану модель, яка враховує індивідуальні швидкості, розміри та потребу в зонах безпеки, але не враховує енергозатрати осіб з протезами. Авторами аналітичного огляду [13] виявлено прогалини в моделях для осіб з функціональними обмеженнями мобільності: відсутність персоналізованих маршрутів та інтеграції біомеханічних розрахунків. Подібні висновки містяться також в роботах [14, 17], де підкреслюється потреба в інклюзивних симуляціях, але жодна модель не поєднує розрахунок енергозатрат на горизонтальних ділянках і сходах саме для осіб з протезами нижніх кінцівок.

Таким чином, існує суттєва наукова прогалина, а саме відсутність інтегрованої математичної моделі, яка поєднує механічну роботу протеза, дисипацію та асиметрію ходи в умовах евакуації при пожежі. Запропонований у статті підхід усуває цю проблему.

Метою роботи є розроблення математичної моделі оцінювання енергозатрат осіб з протезами нижніх кінцівок під час руху евакуаційними

маршрутами в будівлях, що включають горизонтальні ділянки та сходи, з урахуванням біомеханічних особливостей протезування, додаткової інерції штучних сегментів і дисипації енергії в протезних механізмах.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

– Проаналізувати існуючі підходи до моделювання енергозатрат людини під час ходьби та оцінити їх придатність для опису руху осіб з протезами нижніх кінцівок у задачах евакуації при пожежі.

– Розробити математичну модель енергозатрат осіб з протезами нижніх кінцівок під час руху евакуаційними маршрутами, що враховує механічну роботу під час переміщення горизонтальними ділянками та сходами, масу протеза, асиметрію ходи і додаткову дисипацію енергії у протезних механізмах.

– Провести перевірку адекватності запропонованої моделі шляхом числового моделювання типових сценаріїв евакуації та порівняння отриманих результатів з відомими експериментальними даними щодо збільшення енергозатрат у користувачів протезів нижніх кінцівок.

Методи дослідження. У роботі використано методи математичного моделювання та теоретичної механіки для опису енергетичних витрат людини під час руху. Розроблення моделі здійснювалося на основі аналізу біомеханічних принципів ходьби, енергетичного балансу механічної роботи та метаболічних витрат. Для оцінювання адекватності моделі застосовано числове моделювання типових сценаріїв евакуації та порівняння отриманих результатів з даними наукових досліджень щодо енергозатрат осіб з ампутаціями нижніх кінцівок.

Результати дослідження. Розпочнемо із базових принципів моделювання та представимо енергозатрату (E , Дж/кг або мл O_2 /кг · м) як суму механічної роботи ($W_{мех}$) та метаболічних витрат ($W_{метаб}$), з ефективністю м'язів $\eta \approx 0,25$ (вважатимемо, що 25 % механічної роботи перетворюється на рух, а решта – затрати на тепло). Доцільно також ввести метаболічний коефіцієнт $k_{метаб}$. Його значення приймаються на основі узагальнення експериментальних даних і становлять: $k_{метаб} = 1,0$ – для осіб без ампутацій; $k_{метаб} = 1,3$ – для осіб з протезом гомілки; $k_{метаб} = 1,5 \dots 1,6$ – для осіб з протезом стегна. Введення цього коефіцієнта дозволяє врахувати додаткові енергетичні витрати, пов'язані з необхідністю стабілізації тіла, залученням додаткових м'язових груп та зниженням ефективності передачі механічної енергії.

$$E = \frac{k_{\text{метаб}} \cdot W_{\text{мех}}}{\eta} + W_{\text{метаб}}, \quad (1)$$

де $W_{\text{мех}}$ – механічна робота (кінетична та потенційна енергія руху і робота проти тертя), $W_{\text{метаб}}$ – базовий метаболізм.

При розрахунку для протезів додаємо внесок протеза $W_{\text{прот}}$, що включає інерцію та дисипацію енергії в штучних суглобах.

На горизонтальних ділянках основна кількість корисної (рухової) енергії витрачається на прискорення кінцівок, підтримання рівноваги та тертя. Прийемо за основу модифіковану модель на основі механіки ходи [7], де енергія на крок розраховується як сума кінетичної енергії сегментів тіла та протеза.

Кінетична енергія на крок для однієї кінцівки:

$$E_{\text{кін}} = \frac{1}{2} \cdot m_n \cdot v^2 + \frac{1}{2} \cdot m_{\text{прот}} \cdot v_{\text{прот}}^2, \quad (2)$$

де:

m_n – маса ноги (для особи без ампутацій $m_n \approx 0,15 \cdot m_{\text{тіла}}$, для особи з протезом – зменшена в залежності від рівня ампутації: $m_{\text{н.ст}} \approx 0,06 \cdot m_{\text{тіла}}$, для протеза стегна, $m_{\text{н.з}} \approx 0,1 \cdot m_{\text{тіла}}$ для протеза гомілки);

v – швидкість тіла (м/с),

$m_{\text{прот}}$ – маса протеза (кг),

$v_{\text{прот}}$ – швидкість протеза (для синхронної ходи $v_{\text{прот}} \approx v$, але при ампутації стегна або змішаних двосторонніх ампутаціях доцільно ввести коефіцієнт асиметрії $\delta_{\text{асим}}$. При цьому швидкість $v_{\text{прот}} \approx v \cdot (1 - \delta_{\text{асим}})$. В залежності від виду ампутації $\delta_{\text{асим}} = 0,05 \dots 0,3$).

Потенційна енергія на крок (із врахуванням коливання центру маси, $\Delta h_{\text{ц.м.}} \approx 0,03 \dots 0,05$ м):

$$E_{\text{пот}} = m_{\text{тіла}} \cdot g \cdot \Delta h_{\text{ц.м.}}, \quad (3)$$

де:

$g = 9,81$ м/с²,

$m_{\text{тіла}}$ – маса тіла (кг).

Врахуємо дисипацію в протезі під час руху:

$$W_{\text{дис}} = k_{\text{дис}} \cdot d_{\text{кр.}}, \quad (4)$$

де:

$k_{\text{дис}}$ – коефіцієнт дисипації (приймаємо $k_{\text{дис}} = 0,5 \dots 1,0$ Дж/м для модульного протезу $k_{\text{дис}} = 0,2 \dots 0,5$ Дж/м для біонічного протезу),

$d_{\text{кр.}} \approx 0,7-0,8$ м – довжина кроку.

Таким чином загальна енергозатрата на подолання відстані d під час руху горизонтальними ділянками:

$$E_{\text{сориз.}} = \left(N_{\text{кр}} \cdot \frac{k_{\text{метаб}} \cdot (E_{\text{кін}} + E_{\text{пот}} + W_{\text{дис}})}{\eta} \right) + E_{\text{метаб}} \cdot t, \quad (5)$$

де:

$N_{\text{кр}} = \frac{d}{d_{\text{кр.}}}$ – кількість кроків, які необхідно зробити, щоб подолати дистанцію d , $t = \frac{d}{v}$ – час,

$E_{\text{метаб}}$ – базовий метаболізм ($E_{\text{метаб}} \approx 1,5$ Дж/кг · с для стану спокою, підвищується на 10–50 % для користувачів протезів в залежності від виду та рівня ампутації).

Під час **руху сходами** до загальної кількості роботи, необхідної для переміщення по горизонталі, додається робота, необхідна для вертикального переміщення. При цьому потрібно врахувати силу тяжіння.

Тому для підйому або спуску сходами робота становитиме:

$$W_{\text{сход.}} = (m_{\text{тіла}} + m_{\text{прот}}) \cdot g \cdot n_{\text{сход.}} \cdot h_{\text{сход.}} \cdot (1 - \eta_{\text{сх}}), \quad (6)$$

де:

$n_{\text{сход.}}$ – кількість сходинок;

$h_{\text{сход.}}$ – висота сходинки, приймаємо $h_{\text{сход.}} = 0,17$ м

$\eta_{\text{сх}}$ – поправковий коефіцієнт, $\eta_{\text{сх}} = 0,1 \dots 0,2$ для спуску і $\eta_{\text{сх}} = 0$ для підйому.

Необхідно врахувати додаткову дисипацію в протезі на сходах (через необхідність контролю колінного або гомілкоstopного шарніра):

$$W_{\text{дис}} = k_{\text{дис}} \cdot m_{\text{прот}} \cdot g \cdot n_{\text{сход.}} \cdot h_{\text{сход.}}, \quad (7)$$

де:

$k_{\text{дис}} = 1,2 \dots 1,8$ для модульних, $0,8 \dots 1,2$ для біонічних.

Загальна модель енерговитрат для руху сходами:

$$E_{\text{сход}} = \frac{k_{\text{метаб}} \cdot (W_{\text{сход.}} + W_{\text{дис}} + E_{\text{кін.сх.}})}{\eta} + E_{\text{метаб}} \cdot n_{\text{сход.}} \cdot t_{\text{сход.}}, \quad (8)$$

де:

$t_{\text{сход.}}$ – час подолання однієї сходинки. Це значення змінюється в залежності від типу протезу і може становити $t_{\text{сход.}} = 1 \dots 1,7$ с;

$E_{\text{кін.сх.}}$ – кінетична енергія під час руху сходами.

$$E_{\text{кін.сх.}} = \frac{1}{2} \cdot (m_{\text{тіла}} + m_{\text{прот}}) \cdot (v_{\text{верт.}}^2 + v_{\text{гор.}}^2) \cdot n_{\text{сход.}}, \quad (9)$$

де:

$v_{\text{верт.}} = \frac{h_{\text{сход.}}}{t_{\text{сход.}}}$ – вертикальна швидкість при підйомі сходами;

$v_{\text{гор.}} = \frac{d_{\text{сход.}}}{t_{\text{сход.}}}$ – вертикальна швидкість при підйомі сходами;

$d_{\text{сход.}}$ – ширина сходинки.

Для комбінованих маршрутів (горизонтальні ділянки та сходи) сумарну енергозатрату потрібно підсумовувати

Параметри математичної моделі

Параметр	Без ампутації	Протез гомілки	Протез стегна
Маса тіла $m_{тіла}$, кг	80	80	80
Маса ноги m_n , кг	16	10	7
Маса протеза, $m_{прот}$ кг	–	2,5	4,0
Коефіцієнт асиметрії протеза $\delta_{асим}$	–	0,1	0,2
Коефіцієнт дисипації $k_{дис}$, Дж/м	–	0,5	1
Метаболічний коефіцієнт $k_{метаб}$	1,0	1,30	1,55
Довжина кроку $d_{кр}$, м	0,8	0,75	0,7
Висота підйому центру маси $\Delta h_{ц.м.}$, м	0,05	0,05	0,05
Висота сходинки $h_{сход}$, м	0,17	0,17	0,17
ККД руху η	0,25	0,25	0,25
Коефіцієнт гальмування $\eta_{сп}$	0,6	0,6	0,6
Швидкість руху v , м/с	1,4	1,2	1,0

$$E = E_{гориз.} + E_{сход} \quad (10)$$

Валідація розробленої математичної моделі енергозатрат під час евакуації осіб із протезами нижніх кінцівок здійснювалась шляхом аналізу відповідності отриманих результатів фундаментальним законам механіки, біомеханіки руху людини та узгодженості з відомими фізіологічними закономірностями.

У таблиці 1 наведено значення параметрів моделі під час виконання обчислень.

На рис. 1, а представлено залежність енергозатрат від довжини маршруту для горизонтального руху. Отримані результати демонструють лінійний характер зростання енергоспоживання зі збільшенням дистанції, що відповідає теоретичним уявленням про пропорційність роботи сил опору та кількості виконаних кроків. При цьому енергозатрати для осіб із протезом гомілки та стегна перевищують аналогічні показники для здорової людини, що пояснюється додатковими втратами енергії на дисипацію та компенсаційні рухи.

На рис. 1, б наведено аналогічні залежності для руху сходами вгору. Спостерігається суттєве зростання енергозатрат у порівнянні з горизонтальним рухом, що зумовлено необхідністю виконання роботи проти сили тяжіння. При цьому різниця між досліджуваними категоріями осіб є найбільш вираженою, що підтверджує підвищене навантаження на осіб із проксимальними ампутаціями.

На рис. 1в показано залежність енергозатрат при русі сходами вниз. На відміну від підйому, енергозатрати мають менший градієнт зростання, однак залишаються суттєвими. Це пояснюється необхідністю виконання ексцентричної роботи м'язів для контролю руху та стабілізації положення тіла, що враховано в моделі через коефіцієнт керованого гальмування.

Загалом отримані результати відповідають відомим експериментальним спостереженням, згідно з якими:

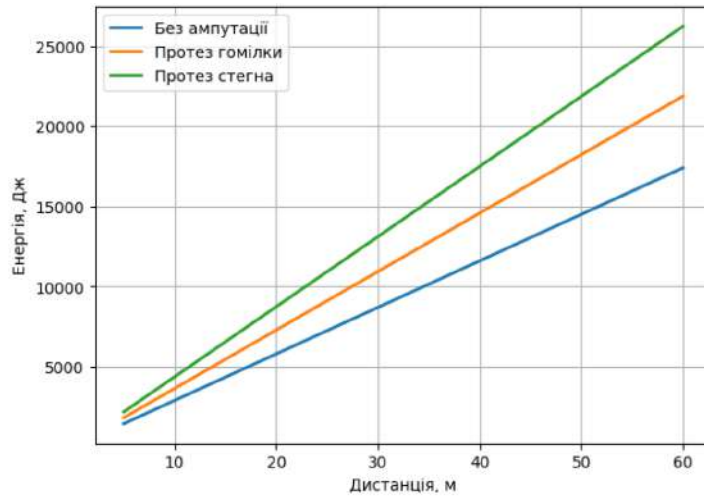
- енергетична вартість пересування осіб із протезами є вищою, ніж у здорових людей;
- найбільш енергозатратним є рух сходами вгору;
- рух сходами вниз, незважаючи на відсутність підйому центру мас, також потребує значних енерговитрат.

Таким чином, модель демонструє фізичну узгодженість, логічну інтерпретованість та придатність для подальшого використання у задачах оцінювання ефективності евакуації. Підвищені значення енергозатрат для осіб із протезами додатково підсилюються введенням метаболічного коефіцієнта, який узагальнено враховує фізіологічну неефективність руху та підтверджує узгодженість моделі з експериментальними спостереженнями.

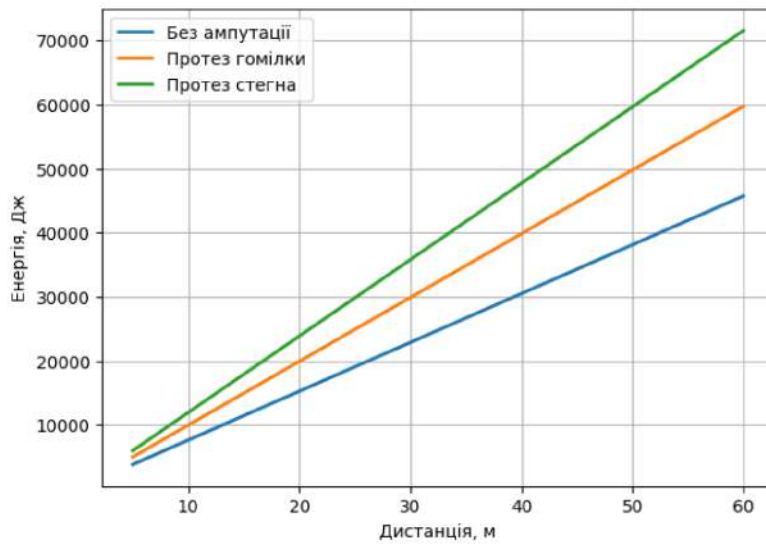
Додаткову валідацію адекватності розробленої моделі проведено шляхом аналізу впливу швидкості руху на енергозатрати при різних типах ділянок евакуаційного маршруту.

На рис. 2, а наведено залежності енергозатрат від швидкості руху для горизонтальної ділянки. Отримані криві мають виражений нелінійний характер, що узгоджується з аналітичною структурою моделі, у якій кінетична енергія та дисипативні втрати пропорційні квадрату швидкості. При цьому для осіб із протезами спостерігається більш стрімке зростання енергозатрат, що пояснюється наявністю додаткових втрат енергії, пов'язаних із неідеальною передачею механічної енергії та необхідністю компенсаційних рухів.

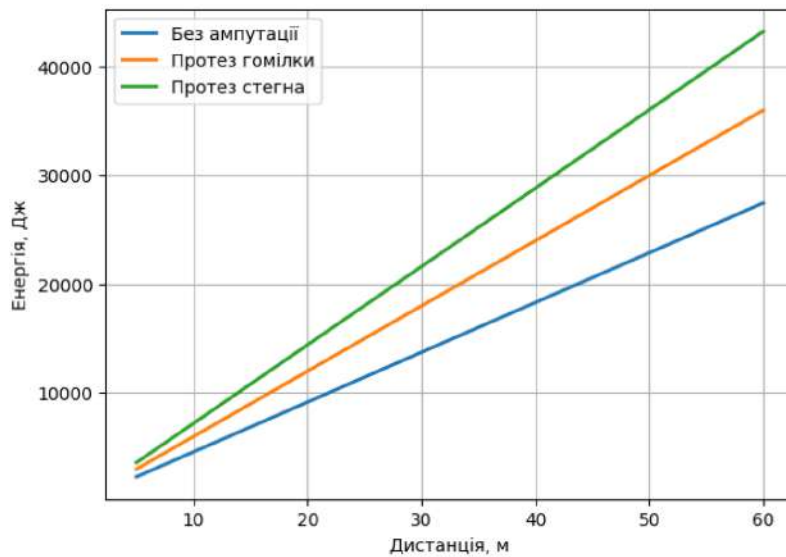
На рис. 2, б представлено аналогічні залежності для руху сходами вгору. На відміну від



а

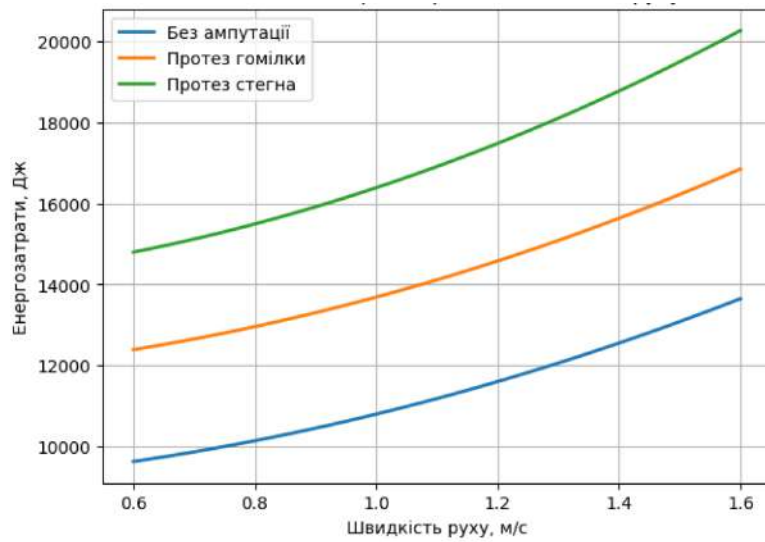


б

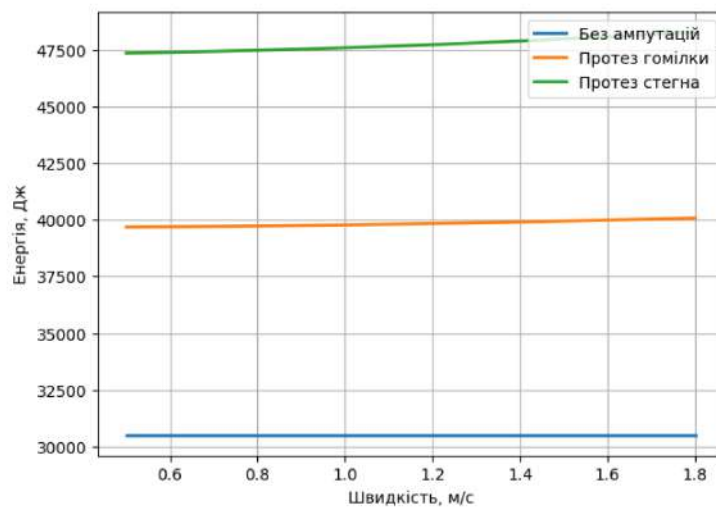


в

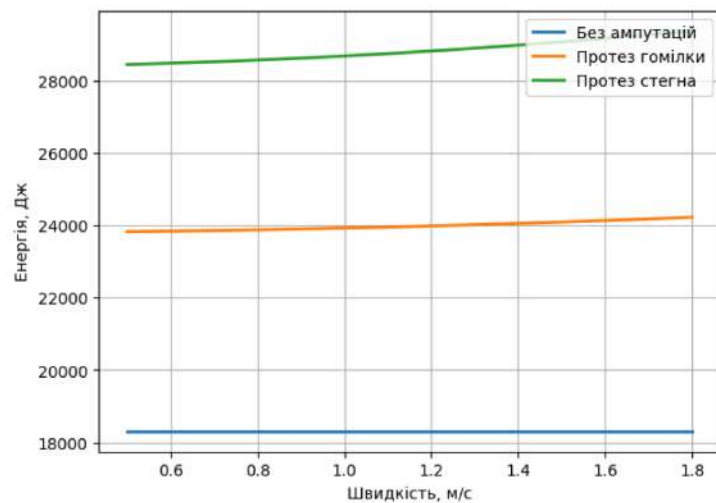
Рис. 1. Залежність енергозатрат від відстані:
 а) рух на горизонтальних ділянках; б) рух сходами вгору; в) рух сходами вниз



а



б



в

Рис. 2. Залежність енергозатрати від швидкості руху:
а) рух на горизонтальних ділянках; б) рух сходами вгору; в) рух сходами вниз

горизонтального руху, отримані результати демонструють слабку залежність енергозатрат від швидкості. Такий характер кривих пояснюється домінуванням складової, пов'язаної з виконанням роботи проти сили тяжіння, яка не залежить від швидкості руху. Внесок швидкісно-залежних компонент (кінетичної енергії та дисипації) є відносно незначним у загальному енергетичному балансі.

На рис. 2, в наведено результати для руху сходами вниз. Як і у випадку підйому, спостерігається незначна залежність енергозатрат від швидкості. Це пояснюється тим, що основну частку енерговитрат становить ексцентрична робота м'язів, спрямована на контроль та стабілізацію руху під час спуску, яка в моделі враховується через коефіцієнт керованого гальмування. Дана складова також практично не залежить від швидкості, тоді як швидкісно-залежні втрати залишаються другорядними.

Таким чином, результати моделювання демонструють принципово різний характер впливу швидкості руху на енергозатрати залежно від типу ділянки: для горизонтального переміщення швидкість є визначальним фактором, тоді як при русі сходами домінують гравітаційні та стабілізаційні складові. Отримані закономірності узгоджуються з базовими положеннями біомеханіки та фізіології руху людини, що підтверджує адекватність запропонованої моделі.

Слід зазначити, що діапазон швидкостей, використаний у моделюванні (до 1,8 м/с), охоплює як типові, так і граничні значення, що дозволяє дослідити загальний характер залежностей енергозатрат. При цьому для осіб із протезами нижніх кінцівок, особливо під час руху сходами, реальні швидкості пересування є суттєво нижчими, а верхня межа діапазону має ілюстративний характер. Отримані результати у зоні підвищених швидкостей слід розглядати як теоретичну екстраполяцію моделі, що не претендує на відображення типових умов евакуації, але дозволяє оцінити граничні тенденції зміни енергозатрат.

Валідація моделі. З огляду на складність проведення натурних експериментів із залученням осіб із протезами нижніх кінцівок, валідацію моделі виконано на основі узагальнення результатів відомих біомеханічних досліджень енергозатрат при ходьбі.

Як критерій порівняння використано питомі енергозатрати (Дж/(кг·м)). Згідно з класичними роботами [15], а також узагальненнями сучасних досліджень, для осіб без ампутацій питомі енергозатрати при ходьбі становлять у середньому

3,0–4,0 Дж/(кг·м). Експериментальні дослідження [16] показали, що для осіб із протезами гомілки енергетичні витрати є приблизно на 16–30 % вищими порівняно зі здоровими особами.

Для осіб із протезами стегна зростання енергоспоживання є ще більш суттєвим і може досягати 50–70 %, що підтверджується як експериментальними, так і оглядовими дослідженнями.

Таблиця 2

Валідація моделі на основі літературних даних

Тип протеза	Літературні значення, Дж/(кг·м)	Результати моделі, Дж/(кг·м)	Узгодженість
Без ампутації	3,0–4,0	3,6	відповідає
Протез гомілки	3,5–5,0	4,7	відповідає
Протез стегна	4,5–7,0	6,2	відповідає

Як видно з табл. 2, результати моделювання для всіх розглянутих категорій осіб потрапляють у діапазони значень, наведені в літературних джерелах, що свідчить про узгодженість моделі з експериментальними даними. та підтверджує адекватність моделі.

Важливо відзначити, що модель коректно відтворює не лише абсолютні значення, але й відносне зростання енергозатрат залежно від рівня ампутації, що узгоджується з відомими біомеханічними закономірностями. Важливо, що модель коректно відтворює відносне зростання енергозатрат: близько 20–30 % для осіб з протезами гомілки і близько 50 % для осіб з протезами стегна, що підтверджується сучасними дослідженнями.

Крім того, встановлено, що підвищення енергетичних витрат пов'язане з необхідністю компенсації втраченої функції суглобів та залученням додаткових м'язових груп, що знижує ефективність руху.

Таким чином, проведена валідація підтверджує, що запропонована модель фізично узгодженою, адекватно відображає біомеханічні закономірності та може бути використана для подальшого аналізу процесів евакуації.

Висновки. У роботі розроблено та апробовано математичну модель оцінювання енергозатрат осіб із протезами нижніх кінцівок під час евакуації, що дозволяє кількісно враховувати вплив типу протезування, параметрів руху та характеристик маршруту.

Відповідно до поставлених завдань отримано такі результати.

1. Сформовано узагальнену модель енергозатрат, яка базується на поєднанні механічних складових руху із урахуванням біомеханічних особливостей пересування осіб із протезами. Введення коригувальних коефіцієнтів, що відображають зміну кінематики руху, додаткові втрати енергії та підвищене метаболічне навантаження, дозволило адаптувати класичні підходи до специфіки досліджуваної категорії осіб.

2. На основі розробленої моделі проведено чисельне моделювання енергозатрат для різних сценаріїв руху, зокрема для горизонтальних ділянок, руху сходами вгору та вниз. Згідно моделі енергозатрати зростають лінійно зі збільшенням довжини маршруту для всіх типів руху, однак їх абсолютні значення істотно відрізняються залежно від типу ділянки. Найбільші витрати енергії характерні для руху сходами вгору, що обумовлено необхідністю виконання роботи проти сили тяжіння, тоді як при русі сходами вниз енергозатрати формуються переважно за рахунок стабілізаційних процесів та контролю руху. Для осіб із протезами, особливо при проксимальних ампутаціях, зафіксовано систематичне зростання енергоспоживання у порівнянні зі здоровими особами.

3. Досліджено вплив швидкості руху на енергозатрати. Показано, що для горизонтального переміщення швидкість є визначальним фактором, що зумовлює нелінійне зростання енергоспоживання. Водночас для руху сходами вплив швидкості є обмеженим, оскільки домінуючими залишаються складові, пов'язані з гравітаційною роботою та стабілізацією тіла. Отримані закономірності узгоджуються з базовими положеннями біомеханіки та фізіології руху людини, що підтверджує адекватність запропонованої моделі.

Загалом результати дослідження свідчать про те, що використання узагальнених енергетичних критеріїв дозволяє більш обґрунтовано оцінювати складність маршрутів евакуації для осіб із протезами та може бути використане при нормуванні евакуаційних шляхів, а також у системах підтримки прийняття рішень в сфері пожежної безпеки.

Разом з тим розроблена модель має певні обмеження. Зокрема, у ній не враховано ефект накопичення втоми в процесі руху. Для відносно коротких дистанцій цей ефект не є критичним для осіб без ампутацій, однак для осіб із протезами навіть на таких ділянках може спостерігатися суттєве зниження функціональних можливостей унаслідок підвищеного метаболічного навантаження. Ігнорування цього ефекту може призводити до

недооцінки реальних енергозатрат і, відповідно, до оптимістичної оцінки здатності до евакуації.

У зв'язку з цим перспективним напрямом подальших досліджень є розширення моделі шляхом урахування динаміки втоми, зокрема через введення залежності енергетичних витрат і доступної потужності від часу або пройденої дистанції, а також її експериментальну перевірку. Доцільним є також врахування індивідуальних характеристик користувачів протезів, типів протезних конструкцій, а також стохастичних факторів, пов'язаних із поведінкою людей у стресових умовах евакуації. Реалізація таких підходів дозволить підвищити точність моделювання та забезпечити створення більш реалістичних інструментів оцінювання ефективності евакуаційних процесів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Жезло-Хлевна Н., Хлевной О., Назар Ю., Борзов Ю., Довбняк В. Евакуація осіб із модульними протезами нижніх кінцівок при пожежі: сучасний стан, проблеми та перспективи досліджень. *Пожежна безпека*. Львів, 2025. № 46. С. 53–64. DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.46.2025.05>
2. Хлевной О., Жезло-Хлевна Н., Доценко О., Борисова А., Калиновський А. Біомеханічні особливості руху осіб із двосторонніми протезами нижніх кінцівок під час евакуації в умовах пожежі. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. Київ, 2025. № 1(19). С. 120–128. DOI: <https://doi.org/10.33269/nvcz.2025>
3. ДСТУ 8828:2019. Пожежна безпека. Загальні положення. [Чинний від 2020-01-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 163 с.
4. ДБН В.2.2-40:2018. Інклюзивність будівель і споруд. [Чинний від 2019-04-01]. Київ : Мінрегіон України, 2018. 70 с.
5. Pandolf K. B., Givoni B., Goldman R. F. Predicting energy expenditure with loads while standing or walking very slowly. *Journal of Applied Physiology*. 1977. Vol. 43, No. 4. P. 577–581. <https://doi.org/10.1152/jappl.1977.43.4.577>
6. Zai C. Z., Grabowski A. M. The metabolic power required to support body weight and accelerate body mass changes during walking on uphill and downhill slopes. *Journal of Biomechanics*. 2020. Vol. 103. 109667. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2020.109667>
7. Cavagna G. A., Thys H., Zamboni A. The sources of external work in level walking and running. *The Journal of Physiology*. 1976. Vol. 262, No. 3. P. 639–657. DOI: <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1976.sp011613>
8. Energy cost of walking in people after lower limb amputation: A systematic review and meta-analysis. *Gait & Posture*. 2020. Vol. 81(S1). P. 89–90. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2020.07.076>

9. Narang Y. S., Arelekatti V. N., Winter A. G. The effects of prosthesis inertial properties on prosthetic knee moment and hip energetics required to achieve able-bodied kinematics. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2016. Vol. 24, No. 7. P. 754–763. DOI: <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2015.2455054>

10. Zelik K. E. et al. Systematic variation of prosthetic foot spring affects center-of-mass mechanics and metabolic cost during walking. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2011. Vol. 19, No. 4. P. 411–419. DOI: <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2011.2159018>

11. Ernst M., Altenburg B., Bellmann M., Schmalz T. Standing on slopes – how current microprocessor-controlled prosthetic feet support transtibial and transfemoral amputees in an everyday task. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2017. Vol. 14. Art. 114. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12984-017-0322-2>

12. Ronchi E., Nilsson D. Fire evacuation in high-rise buildings: a review of human behaviour and modelling research. *Fire Science Reviews*. 2013. Vol. 2. Art. 7. DOI: <https://doi.org/10.1186/2193-0414-2-7>

13. Kuligowski E. D., Peacock R. D., Hoskins B. L. A review of building evacuation models. *Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology*, 2010. (NIST Technical Note 1680). DOI: <https://doi.org/10.6028/NIST.TN.1680>

14. Ronchi E. Developing and validating evacuation models for fire safety engineering. *Fire Safety Journal*. 2021. Vol. 120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103020>

15. Krebbeckx G. G. J., Waterval N. F. J., Brehm M. A., Kerkhoffs G. M. M. J., Bramer J. A. M., Verspoor F. G. M. Gait biomechanics and energy cost of walking after rotationplasty: A systematic review and meta-analysis compared to above-knee amputation and healthy participants. *Clinical Biomechanics*. 2025. Vol. 128. 106626. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2025.106626>

16. Bonnet-Lebrun A., Sedran L., Heidsieck C., Thomas-Pohl M., Pillet H., Bonnet X. Mechanical work and metabolic cost of walking with knee-foot prostheses: a study with a prosthesis simulator. *IRBM*. 2024. Vol. 45, No. 6. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.irbm.2024.100863>

17. Hulida E., Pasnak I., Koval O., Tryhuba A. Determination of the critical time of fire in the building and ensure successful evacuation of people. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2019. Vol. 63, No. 1. P. 308–316. DOI: [10.3311/PPci.12760](https://doi.org/10.3311/PPci.12760)

REFERENCES

1. Zhezlo-Khlevna, N., Khlevnoi, O., Nazar, Yu., Borzov, Yu., & Dovbniak, V. (2025). *Evakuatsiia osib iz modulnymy protezamy nyzhnikh kintsivok pry pozhezhi: suchasnyi stan, problemy ta perspektyvy doslidzhen* [Evacuation of persons with modular lower limb prostheses in case of fire: current state, problems

and research prospects]. *Pozhezhna bezpeka*, (46), 53–64. <https://doi.org/10.32447/20786662.46.2025.05> [in Ukrainian].

2. Khlevnoi, O., Zhezlo-Khlevna, N., Dotsenko, O., Borysova, A., & Kalynovskyi, A. (2025). *Biomekhanichni osoblyvosti rukhu osib iz dvostoronnimy protezamy nyzhnikh kintsivok pid chas evakuatsii v umovakh pozhezhi* [Biomechanical features of movement of persons with bilateral lower limb prostheses during evacuation in fire conditions]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, 1(19), 120–128. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2025> [in Ukrainian].

3. DSTU 8828:2019. (2019). *Pozhezhna bezpeka. Zahalni polozhennia* [Fire safety. General provisions]. Kyiv : DP “UkrNDNTs”. [in Ukrainian].

4. DBN V.2.2-40:2018. (2018). *Inklyuzyvnist budivel i sporud* [Inclusiveness of buildings and structures]. Kyiv : Minrehion Ukrainy. [in Ukrainian].

5. Pandolf, K. B., Givoni, B., & Goldman, R. F. (1977). Predicting energy expenditure with loads while standing or walking very slowly. *Journal of Applied Physiology*, 43(4), 577–581. <https://doi.org/10.1152/jappl.1977.43.4.577>

6. Zai, C. Z., & Grabowski, A. M. (2020). The metabolic power required to support body weight and accelerate body mass changes during walking on uphill and downhill slopes. *Journal of Biomechanics*, 103, 109667. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2020.109667>

7. Cavagna, G. A., Thys, H., & Zamboni, A. (1976). The sources of external work in level walking and running. *The Journal of Physiology*, 262(3), 639–657. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1976.sp011613>

8. (2020). Energy cost of walking in people after lower limb amputation: A systematic review and meta-analysis. *Gait & Posture*, 81(S1), 89–90. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2020.07.076>

9. Narang, Y. S., Arelekatti, V. N., & Winter, A. G. (2016). The effects of prosthesis inertial properties on prosthetic knee moment and hip energetics required to achieve able-bodied kinematics. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 24(7), 754–763. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2015.2455054>

10. Zelik, K. E., et al. (2011). Systematic variation of prosthetic foot spring affects center-of-mass mechanics and metabolic cost during walking. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 19(4), 411–419. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2011.2159018>

11. Ernst, M., Altenburg, B., Bellmann, M., & Schmalz, T. (2017). Standing on slopes – how current microprocessor-controlled prosthetic feet support transtibial and transfemoral amputees in an everyday task. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 14, 114. <https://doi.org/10.1186/s12984-017-0322-2>

12. Ronchi, E., & Nilsson, D. (2013). Fire evacuation in high-rise buildings: a review of human behaviour and modelling research. *Fire Science Reviews*, 2, 7. <https://doi.org/10.1186/2193-0414-2-7>

13. Kuligowski, E. D., Peacock, R. D., & Hoskins, B. L. (2010). *A review of building evacuation models*. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology. <https://doi.org/10.6028/NIST.TN.1680>
14. Ronchi, E. (2021). Developing and validating evacuation models for fire safety engineering. *Fire Safety Journal*, 120. <https://doi.org/10.1016/j.fire-saf.2020.103020>
15. Krebbekx, G. G. J., Waterval, N. F. J., Brehm, M. A., Kerkhoffs, G. M. M. J., Bramer, J. A. M., & Verspoor, F. G. M. (2025). Gait biomechanics and energy cost of walking after rotationplasty: A systematic review and meta-analysis compared to above-knee amputation and healthy participants. *Clinical Biomechanics*, 128, 106626. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2025.106626>
16. Bonnet-Lebrun, A., Sedran, L., Heidsieck, C., Thomas-Pohl, M., Pillet, H., & Bonnet, X. (2024). Mechanical work and metabolic cost of walking with knee-foot prostheses: a study with a prosthesis simulator. *IRBM*, 45(6). <https://doi.org/10.1016/j.irbm.2024.100863>
17. Hulida, E., Pasnak, I., Koval, O., & Tryhuba, A. (2019). Determination of the critical time of fire in the building and ensure successful evacuation of people. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 63(1), 308–316. <https://doi.org/10.3311/PPci.12760>

© Н. В. Жезло-Хлевна, О. В. Хлевной, О. О. Карабин, Ю. С. Назар, В. М. Пилипенко

Науково-методична стаття

Дата першого надходження статті до видання: 10.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.48.2026.04>

М. В. Іщук

*Національний університет цивільного захисту України,
м. Черкаси, Україна*

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0170-1201> – М. В. Іщук

✉ m.ishchuk@dsns.gov.ua

АНАЛІЗ ТАКТИЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ НАЗЕМНОГО РОБОТИЗОВАНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ПОЖЕЖОГАСІННЯ ТА ФОРМУВАННЯ РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ЙОГО УДОСКОНАЛЕННЯ

Постановка проблеми. Наземні роботизовані комплекси (НРК) достатньо широко застосовуються під час пожежогасіння. Особливо активно вони почали впроваджуватися в діяльність підрозділів ДСНС після початку війни. Важливо, що оператор НРК може віддалено керувати ним перебуваючи у безпечному місці, а це безумовно дозволяє забезпечити особовий склад. Враховуючи те, що цей напрям є достатньо новим, тому чітких вимог до конструкції НРК, які можуть бути використані для пожежогасіння поки немає.

Відповідно розробка науково обґрунтованих технічних вимог до конструкції НРК для пожежогасіння з урахуванням вже існуючого досвіду підрозділів ДСНС має надзвичайно важливе значення.

Мета роботи полягає в аналізі тактичних можливостей НРК побудованого на гусеничному шасі за результатами натурних випробувань в умовах наближених до реальних та формування на підставі цього рекомендацій щодо удосконалення його конструкції.

Наукова новизна роботи полягає у науковому обґрунтуванні конструктивних рішень для удосконалення конструкції НРК для пожежогасіння на основі результатів натурних випробувань в умовах полігону.

Висновки. Випробування проводилися з використанням НРК для пожежогасіння Thermite RS3, який сконструйований на гусеничному шасі. Випробування складалося з п'яти послідовних етапів, які дозволяли оцінити роботу та виявити конструктивні недоліки, що обмежували його застосування в конкретних умовах. Встановлено, що НРК має малий кут огляду у зв'язку з відсутністю бокових камер. Водночас неможливо ефективно проводити пожежогасіння резервуарів з легкозаймистими рідинами через відсутність у комплектації НРК, який випробовувався генератора пін середньої або високої кратності. В задимлених середовищах наявні технічні засоби спостереження не дозволяли проводити якісь роботи (видимість становила менше 1 м). При перебуванні НРК у вогневому модулі з температурою всередині до 200 °С виявлено пошкодження пластикових елементів антен передачі відеосигналу та радіокерування але проблем з передачею сигналу під час його роботи не спостерігалось. Розроблено рекомендації для удосконалення його конструкції з урахуванням результатів випробувань. Запропоновано встановити на водопіпні комунікації НРК зливних кранів для зливу залишків вогнегасних речовин після його роботи та обладнати патрубки водопіпних комунікацій з'єднувальними головками типу STORZ.

Ключові слова: пожежа, наземний роботизований комплекс, пожежогасіння, вогневий модуль, випробування.

ANALYSIS OF TACTICAL CAPABILITIES OF A GROUND ROBOTIC FIRE-FIGHTING COMPLEX AND FORMULATION OF RECOMMENDATIONS FOR ITS IMPROVEMENT

Problem Statement. Ground-based robotic systems (GRS) are widely used in firefighting. They began to be introduced into the activities of the State Emergency Service units especially actively after the war. It is important that the GRS operator can remotely control it while being in a safe place, and this certainly allows to protect personnel. Given that this direction is quite new, there are no clear requirements for the design of GRS that can be used for firefighting yet.

Accordingly, the development of scientifically based technical requirements for the design of GRS for firefighting, taking into account the existing experience of the State Emergency Service units, is of utmost importance.

Objective. The purpose of the work is to analyze the tactical capabilities of the GRS built on a tracked chassis based on the results of field tests in conditions close to real ones and to formulate recommendations on improving its design based on this.

The scientific novelty of the work lies in the scientific substantiation of constructive solutions for improving the design of the GRS for fire extinguishing based on the results of field tests in landfill conditions.

Conclusions. The tests were conducted using the Thermite RS3 firefighting vehicle, which is designed on a tracked chassis. The test consisted of five consecutive stages that allowed to evaluate the work and identify design flaws that limited its use in specific conditions. It was established that the GRS has a small viewing angle due to the lack of side cameras. At the same time, it is impossible to effectively extinguish fires in tanks with flammable liquids due to the lack of a medium or high-multiplicity foam generator in the GRS configuration. In smoky environments, the available technical means of observation did not allow any work to be carried out (visibility was less than 1 m). When the GRS was in a fire module with an internal temperature of up to 200 °C, damage was found to the plastic elements of the video signal transmission and radio control antennas, but no problems with signal transmission were observed during its operation. Recommendations were developed to improve its design taking into account the test results. It is proposed to install GRS drain valves on water-foam communications to drain the remains of fire extinguishing agents after its operation and to equip the water-foam communications with STORZ type connecting heads.

Key words: fire, ground robotic complex, fire extinguishing, fire module, testing.

Постановка проблеми. В умовах воєнного стану процес гасіння пожеж ще більше ускладнився, що пов'язано з обстрілами ворожими військами територій і об'єктів нашої країни. Через це на місцях пожеж можуть перебувати вибухонебезпечні предмети і водночас існує небезпека повторних обстрілів, що створює додаткову загрозу для особового складу пожежно-рятувальних підрозділів, які залучені до пожежогасіння. Через це в оперативній діяльності підрозділів ДСНС активно відбувається впровадження наземних роботизованих комплексів (НРК). Вони дозволяють вирішувати різні завдання. Серед них, наприклад, розвідка пожежі, подання вогнегасних речовин до осередку пожежі, розчищення завалів, доставка різноманітного обладнання. За останній час з'явилося багато різних моделей НРК. Кожен НРК має свої технічні характеристики, через які може обмежуватися його застосування в певних конкретних умовах. Водночас важливо, що оператор НРК може віддалено керувати ним перебуваючи у безпечному місці, а це безумовно дозволяє убезпечити особовий склад.

Відповідно розробка науково обгрунтованих технічних вимог до конструкції НРК для пожежогасіння з урахуванням вже існуючого досвіду підрозділів ДСНС має надзвичайно важливе значення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Існує достатньо багато різних моделей НРК для пожежогасіння. Всі вони побудовані на різному шасі, частіше всього на гусеничному. Водночас рідко трапляються моделі, які мають колісне або крокуюче шасі.

В роботі [1] наведені результати випробування НРК для пожежогасіння в конструкції, якого було використано шасі на крокуючому ході. Для виявлення пожежі в його передній частині встановлена тепловізійна камера, а для її гасіння позаду розміщено порошковий вогнегасник. Керування НРК здійснюється дистанційно. Завдяки такому шасі він може пересуватися по сходах, долати невеликі рови, переступати через каміння або повалені дерева. Поряд з цим, швидкість пересування є невеликою, а конструкція шасі є достатньо складною. Через свої, у порівнянні з іншими моделями НРК, малі розміри він здатен

доставляти невеликий запас вогнегасних речовин. Це обмежує його застосування переважно для виявлення пожеж та гасіння невеликих локальних вогнищ.

В роботі [2] проаналізовані методи стабільного керування рухами всіх частин конструкції НРК, які мають шасі на крокуючому ході з гідравлічним приводом. Кожен з цих методів має свої переваги і недоліки та може бути використаний для тієї або іншої моделі НРК, які розробляються під конкретні задачі. Встановлено, що інтелектуальні методи керування мають кращу адаптивність, тому їх рекомендовано застосовувати в тих розробках, які повинні виконувати своє переміщення по нерівній поверхні.

В роботі [3] розглядаються шляхи вирішення однієї з проблем, яка пов'язана з моделями НРК, які мають шасі на крокуючому ході з гідравлічним приводом, що полягає у надмірному натиску кожної стопи на поверхню землі, а це негативно впливає в цілому на стабільність руху. Пропонується введення перехідної ланки в колінному суглобі, що дозволить перетворюючи традиційну трисегментну топологію ноги з трьома ступенями вільності на чотири сегментну структуру з трьома ступенями вільності. Крім того, для обмеження руху ланок у колінному суглобі включено повністю симетричний чотирипоршневий пневматичний опорний механізм, що характеризується регульованою високою жорсткістю та мінімальною деформацією. Одночасно, шляхом оптимізації довжин ланок та положення точок шарніра, фіксований напрямок деформації пружного елемента досягається майже по всьому робочому простору положень кінцівок ніг, тоді як рушійні сили суглобів під час динамічного руху ще більше зменшуються.

В роботі [4] розглядаються шляхи подолання проблеми, яка пов'язана з небезпеками ковзання, заносу та перекидання колісних НРК. Для цього були використані методи геометричного моделювання та карти рельєфу, які дозволили спрогнозувати названі небезпечні ситуації. Форма контактних плям коліс НРК на поверхні землі має вигляд кіл. У випадку зменшення площі контактних плям коліс на нерівних поверхнях землі можна прогнозувати небезпеку настання вказаних раніше граничних моментів.

В роботі [5] розглядається технічне оснащення для НРК, яке дозволяє більш ефективно виявляти осередок пожежі. Проблема полягає у тому, що деякі моделі НРК мають лише телекамери, за допомогою яких не завжди можна швидко виявити осередок пожежі. В цій роботі НРК на колісному шасі було обладнано датчиками виявлення диму, полум'я та вимірювання температури. Модельні

осередки пожежі розміщувалися на п'ятьох різних відстанях. Встановлено, що запропоноване оснащення дозволяє виявляти осередки пожежі навіть за максимальної віддаленості НРК від них. Точність виявлення осередків пожежі складала 92 %.

В роботі [6] розглядається конструкція НРК з колісною формулою 6×6, який може бути використаний для пожежогасіння та виконання замірів значень гамма-випромінювання. Приведення його в рух здійснюється за рахунок встановлення шести двигунів з редуктором. З допомогою встановленої електронної системи це дозволяє незалежно регулювати значення крутного моменту на кожному колесі. Поряд з цим в роботі розглядається кінематична схема такого НРК, схема динаміки руху, моделюється його здатність долати схили та перешкоди ступінчастого типу. Виявлено, що зі збільшенням висоти центру мас покращувалися характеристики під час підйому при подоланні перешкод ступінчастого типу, але це водночас спричиняло втрату стійкості, якщо переміщення відбувалося по схилу, а також погіршувало процес гальмування під час спуску зі схилу. В роботі вказано, що в певних умовах можливо покращити деякі характеристики НРК у випадку його побудови на гусеничному шасі.

В роботі [7] розглянуто конструкцію, технічні характеристики та проведено моделювання процесу гасіння пожежі НРК на колісному шасі, який обладнаний туреллю, яка має два степені свободи і дозволяє метати контейнери у вигляді куль, що заповнені вогнегасною речовиною до осередку пожежі. Колеса НРК спеціально розробленої конструкції, яка дозволяє йому швидко переміщуватися і долати перешкоди ступінчастого типу. Привід до них реалізований з допомогою двох гідродвигунів та ланцюгово-редукторного механізму. Один двигун приводить у рух праві колеса, а інший – ліві. Метання контейнерів з допомогою встановленої на НРК турелі можливо на відстань до 80 м по горизонталі і до 30 м по вертикалі, що в деяких випадках далі ніж при подаванні суцільних водяних струменів до осередку пожежі при використанні лафетних стволів, які встановлені на деяких моделях відомих НРК.

В роботі [8] наведено обґрунтування конструкції НРК для пожежогасіння побудованого на шарнірно-зчленованому гусеничному шасі та досліджено його характеристики. Побудовано математичну модель, яка описує його рух, а також проведено кінематичний аналіз і досліджено стійкість НРК при подоланні перешкод. Завдяки використанню такого шасі, НРК здатен пересуватися по м'яких ґрунтах і навіть долати перешкоди ступінчастого типу. Наявність керованого лафетного

стволо дозволяє оператору віддалено керувати процесом гасіння пожежі.

В роботі [9] розглянуто конструкцію НРК на гусеничному шасі, який був спеціально розроблений для виявлення пожеж і їх гасіння в будівлях різного призначення. У зв'язку з тим, що в будівлі може відбуватися горіння різних речовин, для більш ефективного процесу гасіння НРК обладнаний чотирма різними вогнегасниками. Водночас таке технічне рішення і обмежує його застосування, тому через такий незначний сумарний запас вогнегасних речовин він може бути використаний лише для гасіння невеликих за площею загорянь. Відповідно найбільш ефективним є його застосування на початкових етапах розвитку пожежі.

В роботі [10] проведено моделювання процесу переміщення НРК на гусеничному шасі, а також кінематичний аналіз при подоланні ним перешкод ступінчастого типу. Для зменшення вібрації корпусу пропонується включити до конструкції підвіски пружинні амортизатори. Залежно від габаритів та маси НРК розглядаються розрахункові методи для визначення найбільш доцільних характеристик гусеничного шасі та потужності двигуна. Встановлено, що на стійкість його при подоланні перешкод ступінчастого типу крім характеристик гусеничного шасі також має значний вплив розміщення центру маси, що необхідно враховувати на етапі проектування.

Таким чином, існує достатньо багато різновидів НРК для пожежогасіння. В їх конструкції переважно використовуються шасі: або на крокуючому ході, або колісне, або гусеничне. Кожне з названих шасі має свої переваги та недоліки і впливає на здатність НРК долати різні види перешкод. Для виявлення осередків пожежі в більшості конструкцій використовуються телекамери, тепловізійні камери, датчики для виявлення диму та полум'я. НРК можуть бути спроектовані для застосування або тільки в приміщеннях, або на відкритих територіях, або як універсальні. Більшість універсальних НРК для пожежогасіння конструюються на гусеничному шасі, яке дозволяє їм пересуватися по м'яким ґрунтам та щебеню, а також при застосуванні певних конструктивних рішень навіть долати перешкоди ступінчастого типу. В більшості робіт тактичні можливості НРК досліджуються лише теоретично. Натурні випробування проведені тільки в окремих роботах і, при цьому, вони обмежені певними умовами.

Отже, актуальним і малодослідженим питанням є аналіз тактичних можливостей НРК для пожежогасіння в процесі натурних випробувань в умовах наближених до реальних.

Мета та завдання дослідження. Мета роботи полягає в аналізі тактичних можливостей наземного роботизованого комплексу побудованого на гусеничному шасі за результатами натурних випробувань в умовах наближених до реальних та формування на підставі цього рекомендацій щодо удосконалення його конструкції.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- провести натурні випробування НРК для пожежогасіння в умовах наближених до реальних;

- розробити рекомендації щодо удосконалення конструкції НРК для пожежогасіння.

Методи дослідження. У роботі використані методи проведення натурних випробувань в умовах полігону. Для опрацювання отриманих результатів та розробки рекомендацій щодо удосконалення конструкції НРК для пожежогасіння були використані методи аналізу та синтезу.

Виклад основного матеріалу. Випробування проводилися з використанням НРК для пожежогасіння Thermite RS3, який був виготовлений компанією Howe & Howe Technologies. Цей НРК побудований на гусеничному шасі і має наступні характеристики: обладнаний дизельним двигуном внутрішнього згорання потужністю 36,8 к.с.; час роботи без дозаправки – до 20 годин; вага його складає 1588 кг; дорожній просвіт (кліренс) становить 0,25 м; габаритні розміри – 2,14 × 1,66 × 1,6383 м; керування є дистанційним і залежно від особливостей місцевості може здійснюватися з відстані до 300 м; швидкість руху складає до 13 км/год; обладнаний телекамерою та тепловізійною камерою; має лебідку з тяговим зусиллям 3629 кг; обладнаний лафетним стволом в якого дальність подачі суцільного струменя води складає до 100 м, тиск близько 13,8 бара, подача – 9464 л/хв; максимальний кут підйому, який він здатен долати складає 50 %, а кут нахилу поверхні – 35 %; обладнаний системою зрошення. Вказані технічні характеристики були заявлені виробником. На рис. 1 наведено загальний вигляд НРК для пожежогасіння Thermite RS3.

Етапів випробування було п'ять і проведення кожного з них відбувалося на певних локаціях, а саме:

- етап перший – гасіння пожежі автомобільного транспорту;

- етап другий – гасіння пожежі резервуару з легкозаймистою рідиною. Імітація ліквідації пожеж на території нафтобаз в безпосередній близькості до осередку загорання;

- етап третій – вогневий модуль. Робота у задимлених приміщеннях;



Рис. 1. Загальний вигляд НРК для пожежогасіння Thermite RS3

– етап четвертий – вогневий модуль. Приміщення з високою температурою максимально наближеної до реальної (до 200 °С);

– етап п'ятий – гасіння розгерметизованого резервуара з якого відбувається витік горючого газу.

Перший етап випробувань, як було наведено раніше передбачав гасіння НРК пожежі на транспорті. Попередньо до НРК було приєднано дві магістральні рукавні лінії довжиною кожна по 80 м (діаметр рукавів 77 мм), які прокладалися від пожежної автоцистерни АЦ-8-50(63022)-530М. Оператор за допомогою мобільної панелі керування направляв НРК до місця гасіння пожежі на транспорті. Водночас на НРК вмикалася в роботу система зрошення, а також відбувалося подавання розпиленого струменя води від стаціонарного лафетного ствола, яким обладнаний НРК для створення максимального захисту основних його конструктивних елементів від прямої дії вогню. Далі оператор змінив розпилений струмінь води на компактний та проводив гасіння осередків пожежі. Напрямок подавання води змінювався за рахунок маневрування лафетним стволом та зміною позиції НРК. При тиску на пожежному насосі пожежної автоцистерни 9 бар тиск на лафетному стволі НРК становив 6,8 бар, чого було достатньо для гасіння пожежі. Фото порядку проведення випробування наведено на рис. 2.

За результатами випробування на цьому етапі встановлено, що НРК реагує на дії оператора, а краплі води створюють мінімальне запотівання камери. Наявність відвалу в передній частині НРК дозволяє йому розчищати шлях до місця роботи, в тому числі переміщати легкові автомобілі, які перебувають на проїзній частині. Поряд з цим, було виявлено, що НРК має малий кут огляду у зв'язку з відсутністю бокових камер.

Другий етап випробувань полягав у випробуванні НРК в процесі гасіння пожежі резервуару з легкозаймистою рідиною. Для цього до НРК була приєднана одна рукавна лінія довжиною 160 м (діаметр рукавів 77 мм), яка прокладалася від пожежної автоцистерни АЦ-8-50(63022)-530М. Оператор за допомогою мобільної панелі керування направляв НРК до місця гасіння пожежі резервуару з легкозаймистою рідиною, вмикав захисну завісу та подачу розпиленого струменя води від стаціонарного лафетного ствола для створення захисної завіси. Далі відбувалося подавання суцільного струменя води для гасіння осередку пожежі. Тиск на насосі пожежної автоцистерни становив 9 бар, тиск на лафетному стволі – 4,8 бар, а дальність подачі струменя води становила від 30 до 40 м. Серед недоліків під час застосування НРК для гасіння пожежі було виявлено, як і на першому етапі випробувань, обмежений кут огляду через відсутність камер. Водночас процес гасіння пожеж резервуарів з легкозаймистими рідинами є складним завданням через відсутність в даній комплектації НРК генератора піни середньої або високої кратності. Фото порядку проведення цього випробування наведено на рис. 3.

На третьому етапі випробувань перевірялася здатність роботи НРК в задимленому середовищі. Для цього в кінці вогневого модуля була підпалена горюча речовина з метою створення в ньому задимлення. Перед в'їздом до вогневого модуля оператор вмикав в роботу систему зрошення та направляв НРК в середину. НРК перебував на безпечній відстані від осередку горіння, тому його корпус не піддавався прямому впливу



Рис. 2. Процес випробування НРК під час гасіння пожежі на транспорті



Рис. 3. Процес випробування НРК під час гасіння пожежі резервуару з легкозаймистою рідиною

вогню. За результатами випробування було встановлено, що НРК з наявними технічними засобами спостереження не пристосований до роботи в задимлених середовищах (видимість становила менше 1 м).

На четвертому етапі випробувань перевірялася здатність НРК долати перешкоди у вигляді підйомів та виконувати роботи в умовах високих температур. Випробування відбувалося у вогневому модулі в кінець якого була поміщена горюча речовина, яка далі підпалювалася, що дозволило в середині створити температуру до 200 °С. Температура в середині вимірювалася з допомогою тепловізора 3М Scott V320. Оператор направляв НРК у вогневий модуль при цьому на ньому вмикалася в роботу система зрошення. При в'їзді у вогневий модуль від долав підйом в 12° і далі перебував у вогневому модулі впродовж 10 хвилин. Прямої дії вогню на корпус НРК не було. По закінченню вказаного терміну перебування у вогневому модулі НРК заднім ходом виїжджав з нього долаючи, при цьому, спуск в 12°. Далі проводився зовнішній огляд НРК з метою виявлення можливих пошкоджень. В результаті цього виявлено пошкодження пластикових елементів антен передачі відеосигналу та радіокерування але проблем з передачею сигналу під час роботи НРК не спостерігалось. Фото порядку проведення цього випробування наведено на рис. 4.

Останній етап випробувань полягав у перевірці можливості використання НРК при гасінні пожеж, які пов'язані з витоком горючого газу з резервуарів, в яких він зберігається. Оператор направляв НРК до місця гасіння модельного вогнища з увімкненням в роботу системи зрошення та подаванням розпиленого струменя води зі стаціонарного лафетного ствола. Далі оператор дистанційно змінював форму струменя води на суцільну і шляхом маневрування лафетним стволом було виконано зрізування факелу горіння, що могло дозволити особовому складу в захисному одязі та спорядженні встановити запірну арматуру для припинення витoku газу. Як і в попередніх етапах випробувань було виявлено, що НРК має малий кут огляду у зв'язку з відсутністю бокових камер. Фото порядку проведення цього випробування наведено на рис. 5.

З урахуванням результатів проведених випробувань можна сформулювати наступні рекомендації для удосконалення конструкції НРК для пожежогасіння, а саме:

- необхідно провести оновлення контролера для забезпечення роботи сигналів керування та відеозв'язку з мінімально можливою затримкою та оснащення функціям запису відео, а також передачі онлайн трансляції з місця роботи;
- встановити додатковий захист для системи передачі відеосигналу та радіокерування від впливу високих температур;



Рис. 4. Перевірка здатності НРК виконувати роботи в умовах високих температур



Рис. 5. Перевірка здатності НРК виконувати гасіння пожеж, які пов'язані з вибухом горючого газу з резервуарів, в яких він зберігається

- встановити покращену систему керування або підсилювач сигналу для збільшення дальності роботи понад 300 м, що необхідно для забезпечення безпеки оператора;

- передбачити можливість комплектування НРК генераторами піни середньої та високої кратності;

- встановити бокові камери для забезпечення видимості при маневруванні НРК в умовах обмеженого простору;

- встановити на водопіnnі комунікації НРК зливні крани для зливу залишків вогнегасних речовин після його роботи, що необхідно в умовах експлуатації за низьких температур навколишнього середовища, а також головок-заглушок на з'єднувальні головки, які використовуються для приєднання рукавних ліній;

- встановити на патрубках водопіnnих комунікацій з'єднувальних головок типу STORZ для можливості приєднання пожежних рукавів діаметром 77 мм.

Висновки. За результатами проведених випробувань зроблені наступні висновки:

1. Встановлено, що НРК має малий кут огляду у зв'язку з відсутністю бокових камер. Водночас неможливо ефективно проводити пожежогасіння резервуарів з легкозаймистими рідинами через відсутність у комплектації НРК, який випробовувався генератора піни середньої або високої кратності. В задимлених середовищах наявні технічні засоби спостереження не дозволяли проводити роботи (видимість становила менше 1 м). Проблем подолання перешкод у вигляді похилих поверхонь з кутом нахилу 12° не виникало. При перебуванні НРК у вогневому модулі з температурою всередині до 200°C виявлено пошкодження пластикових елементів антен передачі відеосигналу та радіокерування але проблем з передачею сигналу під час його роботи не спостерігалось.

2. Розроблено рекомендації для удосконалення конструкції НРК з урахуванням результатів випробувань. Запропоновано встановити на

водопіnnі комунікації НРК зливних кранів для зливу залишків вогнегасних речовин після його роботи та обладнати патрубки водопіnnих комунікацій з'єднувальними головками типу STORZ.

В подальшому планується провести кінематичний аналіз і детально дослідити стійкість НРК при подоланні різних типів перешкод.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Baird C., Nokleby S. Autonomous firefighting using a quadruped robot. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*. 2024. Vol. 48. P. 605–616. DOI: <https://doi.org/10.1139/tcsme-2023-0175>

2. Dongyi R., Guitao S. Review on Stable Motion Control Methods of Whole Body for Hydraulic Quadruped Robots. *Recent Advances in Electrical and Electronic Engineering*. 2026. Vol. 19. DOI: <https://doi.org/10.2174/0123520965387219250613053121>

3. Hua Z., Hua D., Rong X., Sun Y. Hydraulic actuated leg with passive flexibility and energy efficiency for heavy-duty quadruped robots. *Mechatronics*. 2026. Vol. 115. 103461. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2026.103461>

4. Mousse C. O., Benrabah M., Denis D., Marmoiton F., Chapuis R. Efficient Attitude Estimation for Mobile Wheeled Robots Using Elevation Maps. *IFAC-PapersOnLine*. 2025. Vol. 59. P. 61–66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2025.07.011>

5. Sucuoglu H. S., Bogrekcı I., Demircioglu P. Development of Mobile Robot with Sensor Fusion Fire Detection Unit. *IFAC-PapersOnLine*. 2018. Vol. 51. P. 430–435. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.11.324>

6. Grigore L. Ş., Gorgoteanu D., Molder C., Alexa O., Oncioiu I., Ştefan A., et al. A Dynamic Motion Analysis of a Six-Wheel Ground Vehicle for Emergency Intervention Actions. *Sensors*. 2021. Vol. 21 (5). 1618. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21051618>

7. Tanyıldızı A. K. Design, Control and Stabilization of a Transformable Wheeled Fire Fighting Robot with a Fire-Extinguishing, Ball-Shooting Turret. *Machines*. 2023. Vol. 11(4). 492. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines11040492>

8. Zhao J., Zhang Z., Liu S., Tao Y., Liu Y. Design and Research of an Articulated Tracked Firefighting Robot. *Sensors*. 2022. Vol. 22 (14). 5086. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22145086>

9. Li S., Yun J., Feng C., Gao Y., Yang J., Sun G., et al. An Indoor Autonomous Inspection and Firefighting Robot Based on SLAM and Flame Image Recognition. *Fire*. 2023. Vol. 6 (3). 93. DOI: <https://doi.org/10.3390/fire6030093>

10. Xiangliang Z., Hua Z., Gen X., Yilin Z. Design and Simulation of Tracked Fire Fighting Robot based on RecurDyn. *Editorial Office of Journal of Mechanical Transmission*. 2020. Vol. 44. P. 89–95. DOI: <https://doi.org/10.16578/j.issn.1004.2539.2020.06.016>

REFERENCES

1. Baird, C., & Nokleby, S. (2024). Autonomous firefighting using a quadruped robot. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 48, 605–616. <https://doi.org/10.1139/tcsme-2023-0175>

2. Dongyi, R., & Guitao, S. (2026). Review on Stable Motion Control Methods of Whole Body for Hydraulic Quadruped Robots. *Recent Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 19. <https://doi.org/10.2174/0123520965387219250613053121>

3. Hua, Z., Hua, D., Rong, X., & Sun, Y. (2026). Hydraulic actuated leg with passive flexibility and energy efficiency for heavy-duty quadruped robots. *Mechatronics*, 115, 103461. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2026.103461>

4. Mousse, C. O., Benrabah, M., Denis, D., Marmouton, F., & Chapuis, R. (2025). Efficient Attitude Estimation for Mobile Wheeled Robots Using Elevation Maps. *IFAC-PapersOnLine*, 59, 61–66. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2025.07.011>

5. Sucuoglu, H. S., Bogrekci, I., & Demircioglu, P. (2018). Development of Mobile Robot with Sensor Fusion Fire Detection Unit. *IFAC-PapersOnLine*, 51, 430–435. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.11.324>

6. Grigore, L. Ş., Gorgoteanu, D., Molder, C., Alexa, O., Oncioiu, I., Ştefan, A., et al. (2021). A Dynamic Motion Analysis of a Six-Wheel Ground Vehicle for Emergency Intervention Actions. *Sensors*, 21 (5). 1618. <https://doi.org/10.3390/s21051618>

7. Tanyıldızı, A. K. (2023). Design, Control and Stabilization of a Transformable Wheeled Fire Fighting Robot with a Fire-Extinguishing, Ball-Shooting Turret. *Machines*, 11 (4). 492. <https://doi.org/10.3390/machines11040492>

8. Zhao, J., Zhang, Z., Liu, S., Tao, Y., & Liu, Y. (2022). Design and Research of an Articulated Tracked Firefighting Robot. *Sensors*, 22 (14), 5086. <https://doi.org/10.3390/s22145086>

9. Li, S., Yun, J., Feng, C., Gao, Y., Yang, J., Sun, et al. (2023). An Indoor Autonomous Inspection and Firefighting Robot Based on SLAM and Flame Image Recognition. *Fire*, 6 (3), 93. <https://doi.org/10.3390/fire6030093>

10. Xiangliang, Z., Hua, Z., Gen, X., & Yilin, Z. (2020). Design and Simulation of Tracked Fire Fighting Robot based on RecurDyn. *Editorial Office of Journal of Mechanical Transmission*, 44, 89–95. <https://doi.org/10.16578/j.issn.1004.2539.2020.06.016>

© М. В. Іщук

Оглядова стаття

Дата першого надходження статті до видання: 11.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.48.2026.05>

А. М. Кастраниць, М. І. Тацій, С. С. Сергєєв

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3679-9535> – А. М. Кастраниць

<https://orcid.org/0009-0005-0601-8775> – М. І. Тацій

<https://orcid.org/0009-0005-3311-9192> – С. С. Сергєєв

✉ andriy.kastranets@ldubgd.edu.ua

ШЛЯХИ ЦИФРОВІЗАЦІЇ ДЕРЖАВНОГО НАГЛЯДУ (КОНТРОЛЮ) У СФЕРІ ПОЖЕЖНОЇ ТА ТЕХНОГЕННОЇ БЕЗПЕКИ: РОЗРОБКА І АПРОБАЦІЯ МОБІЛЬНОГО ДОДАТКА «КАЛЬКУЛЯТОР РИЗИКУ»

Проблема. В умовах цифрової трансформації державного сектору процеси нагляду у сфері пожежної та техногенної безпеки потребують відмови від застарілих ручних процедур. Проведений бібліометричний аналіз (за допомогою VOSviewer) виявив суттєвий дефіцит прикладних цифрових інструментів для автоматизації рутинної роботи інспектора на об'єктах.

Мета. Провести розробку, тестування та впровадження мобільного додатка «Калькулятор ризику» для оперативного визначення ступеня ризику суб'єктів господарювання відповідно до вимог чинного законодавства України.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети застосовано комплексний підхід. Теоретичною базою слугувала формалізація та трансформація нормативно-правових критеріїв оцінки в алгоритмічну математичну модель. Технологічна реалізація здійснювалася за допомогою гібридного підходу: розробка логіки та користувацького інтерфейсу базувалася на сучасних вебтехнологіях, а для нативної компіляції та адаптації під операційну систему Android застосовано кросплатформний фреймворк Saracitor. Емпірична валідація продукту здійснювалася методом закритого бета-тестування із залученням репрезентативної групи.

Основні результати дослідження. Розроблено повноцінний мобільний застосунок, ключовою інженерною перевагою якого є повна обчислювальна автономність (Offline Mode) – здатність виконувати розрахунки локально на пристрої без підключення до мережі Інтернет, що є критично важливим для роботи у підвальних приміщеннях та на віддалених об'єктах. Результати закритого тестування за участю 19 осіб підтвердили точність обчислень, швидке та зручне документування результатів оцінки порівняно з традиційним ручним оформленням Відомості щодо віднесення суб'єкта господарювання до високого, середнього або незначного ступеня ризику, а також дозволили оптимізувати ергономіку інтерфейсу. Продукт успішно пройшов модерацію та опублікований на платформі цифрової дистрибуції Google Play.

Висновки. Впровадження мобільного додатка дозволяє виключити ймовірність математичних помилок через людський фактор, суттєво скоротити час обробки інформації та оптимізувати роботу посадових осіб органів державного нагляду (контролю).

Ключові слова: пожежна безпека, техногенна безпека, державний нагляд (контроль), цифровізація, ступінь ризику, мобільний додаток.

PATHWAYS TO DIGITALIZATION OF STATE SUPERVISION (CONTROL) IN THE FIELD OF FIRE AND TECHNOLOGICAL SAFETY: DEVELOPMENT AND TESTING OF THE “RISK CALCULATOR” MOBILE APP

Problem. In the context of the digital transformation of the public sector, oversight processes in the field of fire and industrial safety require a shift away from outdated manual procedures. A bibliometric analysis (conducted using VOSviewer) revealed a significant shortage of practical digital tools for automating the routine work of inspectors at facilities.

Purpose. To develop, test, and implement the “Risk Calculator” mobile application for the rapid determination of the risk level of business entities in accordance with the requirements of current Ukrainian legislation.

Methods. A comprehensive approach was employed to achieve the stated objective. The theoretical foundation was based on the formalization and transformation of regulatory and legal evaluation criteria into an algorithmic mathematical model. Technological implementation was carried out using a hybrid approach: the development of the logic and user interface was based on modern web technologies, and the cross-platform Capacitor framework was used for native compilation and adaptation to the Android operating system. Empirical validation of the product was carried out using a closed beta testing method involving a representative group.

Results. A fully-fledged mobile application was developed, whose key engineering advantage is complete computational autonomy (Offline Mode) – the ability to perform calculations locally on the device without an Internet connection, which is critically important for work in basements and at remote sites. The results of closed testing involving 19 participants confirmed the accuracy of the calculations compared to the traditional manual completion of the form for classifying a business entity as high, medium, or low risk, and also allowed for the optimization of the interface’s ergonomics. The product successfully passed moderation and has been published on the Google Play digital distribution platform.

Conclusion. The implementation of the mobile application eliminates the possibility of mathematical errors due to human error, significantly reduces information processing time, and optimizes the work of officials in state supervisory (control) agencies.

Key words: fire safety, industrial safety, government oversight (regulation), digitalization, risk level, mobile app.

Вступ. В умовах глобального курсу на цифрову трансформацію державного сектору, підвищення ефективності наглядової діяльності у сфері пожежної та техногенної безпеки набуває критичного значення. Діджиталізація вимагає поступової відмови від застарілих ручних процедур на користь швидких автоматизованих рішень. Одним із варіантів впровадження цифрових рішень є процес визначення ступеня ризику суб’єктів господарювання, який наразі супроводжується бюрократичним навантаженням на інспекторський склад.

Постановка проблеми. Відповідно до Закону України «Про основні засади державного нагляду (контролю) у сфері господарської діяльності» [1] та Постанови Кабінету Міністрів України від 5 вересня 2018 р. № 715 «Про затвердження критеріїв, за якими оцінюється ступінь ризику від провадження господарської діяльності та визначається періодичність здійснення планових заходів державного нагляду (контролю) у сфері техногенної та пожежної безпеки Державною службою з надзвичайних ситуацій» [2] в Україні запроваджено розподіл об’єктів суб’єктів господарювання за ступенями ризику на високий,

середній та незначний, що визначає періодичність проведення планових заходів державного нагляду (контролю) (далі – ДНК) у сфері пожежної та техногенної безпеки. У зв’язку з цим на кожен об’єкт суб’єкта господарювання, який перебуває на обліку або береться на облік як нововиявлений в місцевих та територіальних органах ДСНС заводиться наглядова справа (згідно наказу ДСНС України від 18.02.2022 № 129 «Про упорядкування обліку та організації проведення перевірок» [3]), в якій міститься «Відомість щодо віднесення суб’єкта господарювання до високого, середнього або незначного ступеня ризику». Згідно [2], ступінь ризику встановлюється на підставі сумарної кількості балів, нарахованих за кожним із семи критеріїв, за якими оцінюється ступінь ризику від провадження господарської діяльності та відповідно заповнюється відомість. Згідно з даними Державної служби статистики України, станом на кінець 2025 року в Україні налічувалося 1 781 972 фізичних осіб-підприємців та 1 555 887 юридичних осіб [4]. Порівняльний аналіз із показниками 2024 року свідчить про зростання кількості таких осіб на 74 295 та 30 802

відповідно. Таким чином, уповноважена посадова особа територіальних органів ДСНС, закріплена за територіальними громадами, (далі – офіцер-рятувальник громади) за 2025 рік в середньому заповнила 52 форми «Відомості щодо віднесення суб'єкта господарювання до високого, середнього або незначного ступеня ризику» для нововиявлених об'єктів та 83 таких форми – для об'єктів, які в ході своєї діяльності зазнали змін, що стосувалися, до прикладу, переобладнання, зміною категорії будівель, приміщень або зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою, проведенням ідентифікації об'єктів підвищеної небезпеки, категоризацією об'єктів критичної інфраструктури, а також виникненням небезпечних подій і надзвичайних ситуацій.

В умовах цифрової трансформації, ручне введення таких даних не відповідає сучасним вимогам щодо швидкості, точності та уніфікації інформаційних процесів. Автоматизація заповнення документів встановленої форми забезпечує зниження ризику помилок, оптимізацію часових витрат та підвищення якості робочого процесу, що робить її ключовим елементом цифровізації діяльності органів ДСНС.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

На сьогоднішній день питання діджиталізації активно розвивається та досліджується у всіх сферах людської діяльності. У науковій літературі вітчизняні та зарубіжні вчені приділяють увагу вивченню питання впровадження мобільних технологій у сфері пожежної, техногенної безпеки та цивільного захисту. Зокрема, дослідники активно вивчають можливості автоматизації процесів перевірки засобів протипожежного захисту. В деяких дослідженнях пропонується використання мобільних додатків, інтегрованих із методами глибокого машинного навчання та комп'ютерного зору, для інспектування пожежного обладнання в реальному часі [5]. Дослідники зазначають, що традиційні (візуальні) перевірки є тривалими, неефективними та схильними до неточностей через ручні процедури, тоді як впровадження мобільних технологій дозволяє інспекторам виконувати свої функції швидше, точніше та з меншою кількістю помилок. Також науковці працюють в напрямку розробки програмного забезпечення, що допомагає визначити рівень безпеки людини під час перебування у будівлях захисного призначення, що підтверджує актуальність впровадження інформаційних технологій у сфері цивільного захисту та надасть суспільству ефективний інструмент для аналізу та використання даних для вивчення можливих шляхів уникнення або захисту від надзвичайних ситуацій [14].

У вітчизняному науковому просторі значна увага приділяється організаційно-управлінським проблемам наглядової діяльності. Так, вітчизняні вчені висвітлюють питання недосконалість державного управління органами державного нагляду у сфері пожежної та техногенної безпеки. У дослідженнях наголошується на наявності низки суперечливих державних документів, що стосуються оцінки ступеня ризику від провадження господарської діяльності. Це підтверджує нагальну потребу у реформатуванні механізму здійснення наглядових функцій державними органами управління [6]. Саме тому на вищому державному рівні законодавчо закріплено незворотний курс на технологічну модернізацію відповідно до Стратегії цифрового розвитку інноваційної діяльності України на період до 2030 року. Отже, необхідність інтеграції цифрових інструментів у публічні послуги та діяльність державних інституцій залишається актуальною проблемою. Урядовий документ підкреслює необхідність розроблення та впровадження інновацій для підтримки процесу цифрової трансформації державного нагляду [7].

Незважаючи на наявні теоретичні напрацювання щодо недоліків наглядової діяльності та загальні стратегічні орієнтири держави на цифровізацію, питання розробки конкретних прикладних цифрових інструментів (зокрема, кросплатформного мобільного калькулятора ризиків) для автоматизації рутинної роботи інспекторського складу в Україні залишається недостатньо висвітленим у науковій літературі та потребує практичного вирішення.

Мета статті. Розробка та впровадження мобільного додатка для оперативного визначення ступеня ризику від провадження господарської діяльності, спрямованого на оптимізацію витрат часу та підвищення якості робочого процесу посадовими особами органів державного нагляду (контролю).

Виклад основного матеріалу. Для отримання розуміння актуальних тем у сфері пожежної безпеки проведено бібліометричний аналіз наукових публікацій: як україномовних, так і англомовних. Інструментарієм дослідження обрано програмне забезпечення VOSviewer [12] (це інструмент для створення карт на основі масиву публікацій, а також для візуалізації та дослідження цих карт). Даний програмний продукт дав можливість відстежити зв'язки між ключовими поняттями на основі масиву даних із Google Scholar [13] (оброблено 1400 джерел).

В результаті аналізу візуалізації отриманої у [12] можна виділити чітку кластеризацію

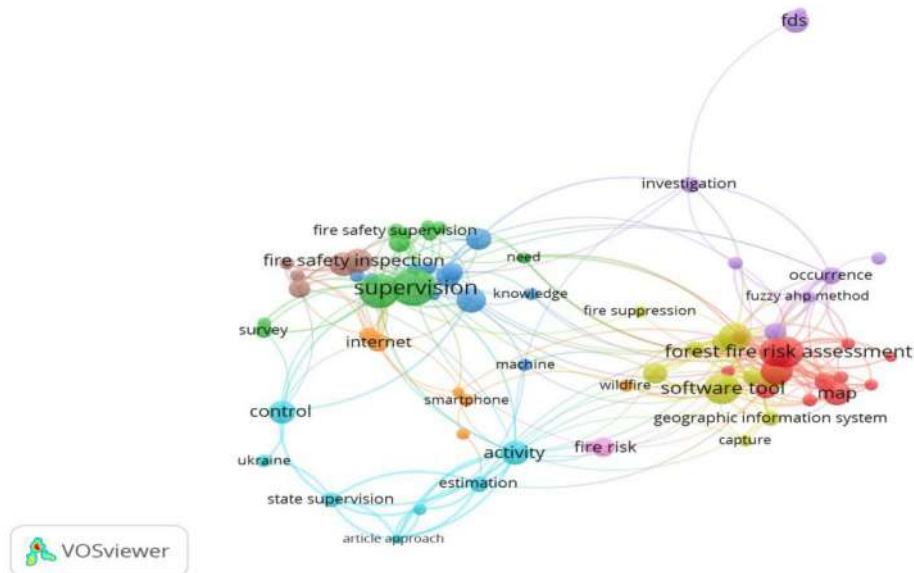


Рис. 1. Карта бібліометричного аналізу ключових слів за темою автоматизації державного нагляду та оцінки ризиків [8, 12, 13]

наукових досліджень (представлено різними кольорами) (рис. 1).

Таких кластерів сформовано 9 із 75 елементів, які між собою пов'язані. Загальна кількість зв'язків складає 308 одиниць.

Проведений бібліометричний аналіз виявляє суттєві напрацювання щодо пожежної безпеки в лісах (червоний кластер), які тісно пов'язані із розробками програмного забезпечення, калькуляторів (жовтий кластер), а також використання математичних інструментів аналізу, симуляторів пожеж (фіолетовий кластер) та мобільних технологій (помаранчевий кластер).

Проте процеси державного нагляду (контролю) залишаються недостатньо охоплені мобільними розрахунковими інструментами, хоча наявний чіткий запит на підвищення ефективності державного нагляду (контролю) і рівня пожежної безпеки, – як в Україні, так і у світі (блакитний, зелений, коричневий кластер). Дані елементи існують розрізнено щодо сучасних апаратних рішень і програмного забезпечення, яке застосовується в більшій мірі для пожежної безпеки екосистем.

Таким чином, для практичного впровадження новітніх технологічних рішень у систему державного нагляду (контролю) у сфері пожежної та техногенної безпеки прийнято рішення розробити інструмент для автоматизації деяких процесів роботи офіцера-рятувальника громади. Основою для створення додатка стала трансформація вимог чинного законодавства у математичну модель [2]. Для написання програмного коду та розробки зовнішнього вигляду програми були використані стандартні вебтехнології. Усі правила розрахунків

(сумування балів, перевірка умов та визначення ступеня ризику) закладені в основу програми. Такий підхід дозволив зробити калькулятор максимально швидким та невибагливим до технічних характеристик пристроїв (комп'ютера чи смартфона). Процес оцінки формалізується як обчислення загальної суми балів за всіма визначеними критеріями. Об'єкт характеризується множиною обраних показників $P = (p_1, p_2, \dots, p_n)$, де кожен показник p_i має законодавчо закріплену вагову оцінку (бал) b_i . Сума балів R розраховується за формулою:

$$R = \sum_{i=1}^n b_i.$$

Алгоритм працює в реальному часі: при виборі користувачем певного показника (наприклад, площі об'єкта, кількості людей, наявності попередніх порушень), додається відповідний бал b_i до загальної суми R . Далі відбувається класифікація об'єкта шляхом порівняння отриманої суми з пороговими значеннями, встановленими нормативами:

1. Якщо $R \geq 41$ – об'єкт відноситься до високого ступеня ризику;
2. Якщо $21 \leq R \leq 40$ – до середнього ступеня ризику;
3. Якщо $R \leq 20$ – до незначного ступеня ризику.

Алгоритм генерації документа у форматі `xlsx` використовує технологію Data Mapping для перенесення значень змінних із середовища додатка у комірки електронних таблиць.

За допомогою інтегрованих бібліотек (зокрема ExcelJS), програма виконує:

1. Автоматичну підстановку ідентифікаційних даних об'єкта та розрахованих балів (b_i) у відповідні поля шаблону документа `xlsx`.

2. Форматування документа: адаптація ширини колонок під згенерований текст, стилізація таблиць.

3. Експорт готового файлу в локальну пам'ять пристрою користувача для відправки.

Для того, щоб створена програма працювала як повноцінний мобільний додаток на операційній системі Android, застосовано технологію перетворення (за допомогою інструмента Saracitor [9]). Це дозволило виконати нативну компіляцію розрахункового алгоритму у звичний формат мобільного застосунку, створивши ізольований інсталяційний пакет (ААВ/АРК). Головною перевагою такого рішення стало забезпечення повністю автономної роботи додатка. Програма виконує всі розрахунки локально на пристрої, без необхідності підключення до мережі Інтернет, що є критично важливим під час перевірок у підвальних приміщеннях або на віддалених промислових об'єктах.

Важливим етапом дослідження стала практична перевірка розробленого додатка в умовах, наближених до реальної роботи офіцера-рятувальника громади. Відповідно до сучасних стандартів розгортання додатків, зокрема, вимог платформи Google Play Console [10], було організовано етап закритого тестування із залученням групи із 19 осіб. Це дозволило вирішити два ключові завдання:

– на практиці підтвердити точність автоматичних розрахунків порівняно з традиційним ручним (паперовим) заповненням “Відомість щодо віднесення суб'єкта господарювання до високого, середнього або незначного ступеня ризику”;

– зібрати відгуки для покращення зручності програми.

– Використання додатка дозволило скоротити час на оформлення документів та визначення ступеня ризику складних багатопрфільних об'єктів у середньому на 75 % (з 10–15 хвилин ручної роботи до 3–5 хвилин роботи в інтерфейсі програми).

Після успішного завершення тестування додаток було опубліковано на платформі Google Play [11].

Мобільний додаток виглядає наступним чином (рис. 2) та складається з основних блоків це «Дані про суб'єкт», де вноситься інформація: «Назва об'єкта», «Назва суб'єкта господарювання», «Адреса об'єкта», «Код ЄДРПОУ» і блок «Критерії оцінювання», який складається із 7 критеріїв відповідно до [2]. А саме:

- Вид об'єкта, де вказується чи він належить до об'єктів підвищеної небезпеки, об'єктів критичної інфраструктури, об'єктів метрополітену, пам'яток культурної спадщини, об'єктів, які категоруються за вибухопожежною та пожежною небезпекою;
- Площа об'єкта;
- Максимальна розрахункова (проектна) кількість людей;
- Умовна висота об'єкта;
- Наявність та масштаб небезпечних подій, надзвичайних ситуацій;
- Клас наслідків (відповідальності) під час будівництва об'єкта;
- Кількість порушень вимог законодавства у сфері техногенної та пожежної безпеки.

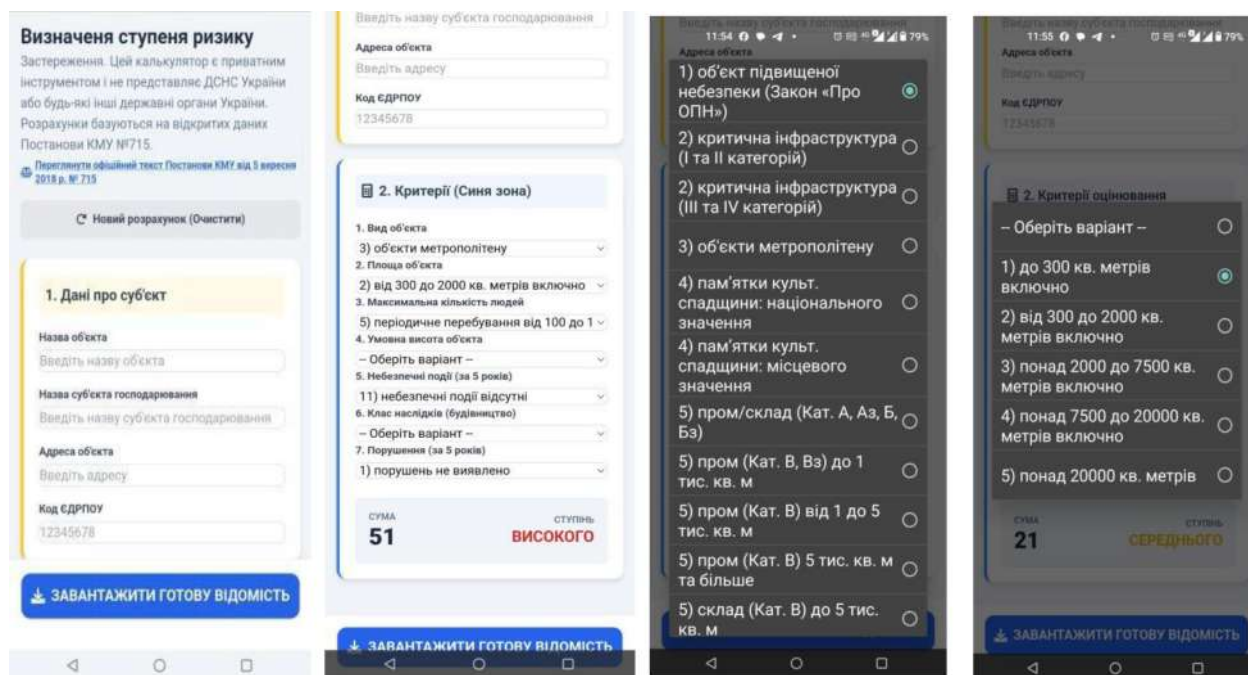


Рис. 2. Внутрішній інтерфейс мобільного додатка «Калькулятор ризику»

3. Про упорядкування обліку та організації проведення перевірок : Наказу ДСНС України від 18.02.2022, № 129.

4. Банк даних [Електронний ресурс]. Державна служба статистики України: офіційний веб-портал. URL: https://stat.gov.ua/uk/explorer?urn=SSSU%3ADF_STATISTICAL_BUSINESS_REGISTER_Q_M%28~%29&filter=REG_INDIV_ENT (дата звернення: 03.03.2026).

5. Weqaa: An Intelligent Mobile Application for Real-Time Inspection of Fire Safety Equipment / R. Alidrisi та ін. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. Червень, 2024. Т. 14, вип. 3. С. 14088–14095. URL: <https://doi.org/10.48084/etasr.7229>

6. Васильєв І. О., Тищенко В. О. Проблеми організації пожежно-профілактичної роботи підрозділами місцевої та добровільної пожежної охорони. *Інвестиції: практика та досвід*. 2020. № 24. С. 118–122. URL: <https://doi.org/DOI:10.32702/2306-6814.2020.24.118>

7. Про схвалення Стратегії цифрового розвитку інноваційної діяльності України на період до 2030 року та затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2025-2027 роках: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 31.12.2024, № 1351-р: станом на 14.07.2025. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1351-2024-%D1%80#Text> (дата звернення: 06.03.2026).

8. *App.vosviewer.com*. URL: <https://app.vosviewer.com/?json=https%3A%2F%2Fdrive.google.com%2Fuc%3Fid%3D1LZxDF-vzJm6pwlDSe8ZxbLb5CkKqPelG> (дата звернення: 25.02.2026).

9. *Capacitor*. URL: <https://capacitorjs.com/> (дата звернення: 27.01.2026).

10. Інструментальна платформа для розробників Google Play Console. URL: <https://play.google.com/console/u/0/developers/6018816227808094477/app/4975836905518714495/main-store-listing>. (дата звернення: 30.01.2026).

11. Офіційний магазин мобільних додатків для операційної системи Android – Google Play. URL: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.fireinspector.calc>

12. Van Eck N. J., Waltman L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*. 2010. Т. 84, вип. 2. С. 523–538. URL: <https://doi.org/DOI:10.1007/s11192-009-0146-3>

13. Google Scholar. URL: https://scholar.google.fi/schhp?hl=uk&as_sdt=0,5 (дата звернення: 25.02.2026).

14. Software for Shelter's Fire Safety and Comfort Levels Evaluation. / Y. Martyn та ін. *Data Stream Mining and Processing*. 2020. Т. 1158 : Communications in Computer and Information Science. С. 457–469. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-61656-4_31

REFERENCES

1. Закон України. (2007, April 5). *Pro osnovni zasady derzhavnoho nahliadu (kontroliu) u sferi hospodarskoï diialnosti* [On the basic principles of state supervision (control) in the field of economic activity] (No. 877-V; updated November 15, 2024). Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/877-16#Text> (accessed March 3, 2026) [in Ukrainian].

2. Kabinet Ministriv Ukrainy. (2018, September 5). *Pro zatverdzhennia kryteriiv, za yakymy otsiniuietsia stupin ryzyku vid provadzhennia hospodarskoï diialnosti ta vyznachaietsia periodychnist zdiisnennia planovykh zakhodiv derzhavnoho nahliadu (kontroliu) u sferi tekhnohennoi ta pozhezhnoi bezpeky Derzhavnoïu sluzhboïu z nadzvychainykh sytuatsii* [On approval of criteria for assessing the degree of risk from economic activity and determining the frequency of planned state supervision (control) measures in the field of technogenic and fire safety by the State Emergency Service] (No. 715; as of December 21, 2022). Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/715-2018-%D0%BF#Text> (accessed March 3, 2026) [in Ukrainian].

3. Derzhavna sluzhba Ukrainy z nadzvychainykh sytuatsii. (2022, February 18). *Pro uporiadkuvannia obliku ta orhanizatsii provedennia perevirok* [On streamlining accounting and organization of inspections] (No. 129) [in Ukrainian].

4. Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy. (n.d.). *Bank danykh* [Data bank]. Retrieved from: https://stat.gov.ua/uk/explorer?urn=SSSU%3ADF_STATISTICAL_BUSINESS_REGISTER_Q_M%28~%29&filter=REG_INDIV_ENT (accessed March 3, 2026) [in Ukrainian].

5. Alidrisi, R., et al. (2024, June). Weqaa: An intelligent mobile application for real-time inspection of fire safety equipment. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 14(3), 14088–14095. <https://doi.org/10.48084/etasr.7229>

6. Vasyliiev, I. O., & Tyshchenko, V. O. (2020). *Problemy orhanizatsii pozhezhno-profilaktychnoi roboty pidrozdilamy mistsevoi ta dobrovilnoi pozhezhnoi okhorony* [Problems of organizing fire prevention work by local and voluntary fire brigades]. *Investytsii: praktyka ta dosvid*, (24), 118–122. <https://doi.org/10.32702/2306-6814.2020.24.118> [in Ukrainian].

7. Kabinet Ministriv Ukrainy. (2024, December 31). *Pro skhvalennia Stratehii tsyfrovoho rozvytku innovatsiinoï diialnosti Ukrainy na period do 2030 roku ta zatverdzhennia operatsiinoho planu zakhodiv z yii realizatsii u 2025–2027 rokakh* [On approval of the Strategy for digital development of innovative activity of Ukraine until 2030 and the operational plan for its implementation in 2025–2027] (No. 1351-r; as of July 14, 2025). Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1351-2024-%D1%80#Text> (accessed March 6, 2026) [in Ukrainian].

8. (n.d.). *VOSviewer online application*. Retrieved from: <https://app.vosviewer.com/?json=https%3A%2F%2Fdrive.google.com%2Fuc%3Fid%3D1LZxDF-vzJm6pwlDSe8ZxbLb5CkKqPelG>

2Fuc%3Fid%3D1LZxDF-vzJm6pwldSe8ZxbLb5Ck-KqPelG (accessed February 25, 2026).

9. (n.d.). *Capacitor*. <https://capacitorjs.com/> (accessed January 27, 2026).

10. Google. (n.d.). *Google Play Console*. Retrieved from: <https://play.google.com/console/u/0/developers/6018816227808094477/app/4975836905518714495/main-store-listing> (accessed January 30, 2026).

11. Google. (n.d.). *Google Play* (mobile application store for Android). Retrieved from: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.fireinspector.calc>

12. Van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523–538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>

13. Google. (n.d.). *Google Scholar*. Retrieved from: https://scholar.google.fi/schhp?hl=uk&as_sdt=0,5 (accessed February 25, 2026).

14. Martyn, Y., et al. (2020). Software for shelter's fire safety and comfort levels evaluation. *Data Stream Mining and Processing*, 1158, 457–469. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61656-4_31

© А. М. Кастраниць, М. І. Тацій, С. С. Сергеев

Науково-методична стаття

Дата першого надходження статті до видання: 15.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.48.2026.06>

*В. В. Ковалишин, В. М. Марич, Р. Б. Веселівський,
Вол. В. Ковалишин, Н. Р. Великий, Р. Я. Лозинський, Я. В. Геревич*
*Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
м. Львів, Україна*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5463-0230> – В. В. Ковалишин
<https://orcid.org/0000-0001-7051-4494> – В. М. Марич
<https://orcid.org/0000-0003-3266-578X> – Р. Б. Веселівський
<https://orcid.org/0000-0003-3739-8668> – Вол. В. Ковалишин
<https://orcid.org/0000-0002-7967-4491> – Н. Р. Великий
<https://orcid.org/0009-0004-7292-711X> – Р. Я. Лозинський
<https://orcid.org/0009-0003-0555-1098> – Я. В. Геревич
✉ marychvolodj@ukr.net

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДИК З ВИЗНАЧЕННЯМ ЕФЕКТИВНОСТІ ГАСІННЯ ВОГНЕГАСНИМИ РЕЧОВИНАМИ ЛІТІЙ-ІОННИХ АКУМУЛЯТОРІВ

Проблема. Стрімке впровадження літій-іонних акумуляторів у транспорті, системах накопичення енергії, портативній електроніці та безпілотних літальних апаратах супроводжується зростанням рівня пожежної небезпеки. Чинні нормативні документи та методики випробувань не повною мірою враховують специфіку фізико-хімічних процесів, притаманних таким пожежам, що ускладнює об'єктивне оцінювання ефективності гасіння та порівняння результатів різних досліджень.

Мета роботи – провести аналіз існуючих методик з визначення ефективності гасіння пожеж літій-іонних акумуляторів різними вогнегасними речовинами, а також виявлення основних недоліків чинних підходів і обґрунтування напрямів удосконалення методик оцінювання вогнегасної ефективності для підвищення рівня пожежної безпеки об'єктів цивільного та спеціального призначення.

Методи дослідження. У роботі застосовано методи системного аналізу, порівняння та узагальнення наукових публікацій і нормативних документів.

Основні результати дослідження. Встановлено, що існуючі методики суттєво відрізняються за способом моделювання пожежі. У низці методик використовується обмежена ємність акумуляторів або умови, що не відтворюють реальні сценарії пожежі, що знижує практичну цінність результатів. Виявлено відсутність уніфікованих підходів до визначення граничної температури теплового розгону, мінімальної інтенсивності подачі вогнегасної речовини та критеріїв припинення горіння. Доведено, що ефективність гасіння суттєво залежить від режиму подачі вогнегасної речовини, конструкції батареї та умов теплового навантаження.

Висновки. Сучасні дослідження підтверджують відсутність комплексної уніфікованої методики оцінювання ефективності гасіння літій-іонних акумуляторів і обґрунтовують необхідність систематизації та вдосконалення існуючих підходів з урахуванням реальних умов експлуатації та сучасних загроз.

Ключові слова: літій-іонні акумулятори, гасіння пожеж, методики, вогнегасні речовини, легкі метали.

ANALYSIS OF EXISTING METHODS FOR DETERMINING THE EFFECTIVENESS OF EXTINGUISHING LITHIUM-ION BATTERIES WITH FIRE EXTINGUISHING AGENTS

Problem. The rapid adoption of lithium-ion batteries in transportation, energy storage systems, portable electronics, and unmanned aerial vehicles is accompanied by an increased fire hazard. Current regulatory documents and testing methodologies do not fully account for the specific physicochemical processes inherent in such fires, which complicates the objective assessment of extinguishing effectiveness and the comparison of results across different studies.

Objective is to analyze existing methods for assessing the effectiveness of extinguishing lithium-ion battery fires using various fire extinguishing agents, to identify the main shortcomings of current approaches, and to justify directions for improving evaluation methodologies to enhance fire safety in both civil and specialized facilities.

Research Methods. This study employs methods of system analysis, comparison, and synthesis of scientific publications and regulatory documents.

Main research results. It was established that existing methodologies differ significantly in the way fires are modeled. In some methods, batteries of limited capacity are used or conditions that do not replicate real fire scenarios, which reduces the practical value of the results. A lack of standardized approaches was identified for determining the critical temperature for thermal runaway, the minimum intensity of fire extinguishing agent delivery, and criteria for fire cessation. It was demonstrated that the effectiveness of extinguishing largely depends on the mode of agent application, battery design, and thermal load conditions.

Conclusions. Current studies confirm the absence of a comprehensive, standardized methodology for evaluating the effectiveness of extinguishing lithium-ion battery fires and justify the need to systematize and improve existing approaches, taking into account real operating conditions and contemporary threats.

Key words: lithium-ion batteries, fire suppression, methodologies, fire extinguishing agents, light metals.

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток електротранспорту, портативної електроніки, систем зберігання енергії та відновлюваної енергетики зумовив широке впровадження літій-іонних акумуляторів у різні галузі промисловості та побуту. Паралельно з воєнними загрозами в Україні спостерігається стрімке зростання виробництва та використання безпілотних літальних апаратів, що, у свою чергу, обумовлює масове виготовлення, зберігання та експлуатацію літій-іонних батарей. Водночас експлуатація літій-іонних акумуляторів супроводжується підвищеним рівнем пожежної небезпеки, зумовленої можливістю теплового розгону, коротких замикань, механічних пошкоджень або порушення режимів заряджання та розряджання. Пожежі за участю таких акумуляторів характеризуються високою температурою горіння, виділенням токсичних газів і схильністю до повторного займання, що суттєво ускладнює процес їх гасіння.

Існуючі вогнегасні речовини та методи пожежогасіння, які традиційно застосовуються для твердих, рідких або газоподібних горючих матеріалів, не завжди є ефективними у випадку пожеж літій-іонних акумуляторів. На практиці спостерігається відсутність єдиного підходу до оцінювання ефективності гасіння таких пожеж, а результати експериментальних досліджень різних авторів часто

є суперечливими або важко порівнюваними через відмінності у методиках випробувань, умовах експерименту та критеріях ефективності.

Аналіз сучасного стану проблеми свідчить, що існуючі нормативні документи, методики випробувань і розрахунку вогнегасної ефективності не повною мірою враховують специфіку пожеж, спричинених літій-іонними акумуляторами.

У зв'язку з цим актуальною науково-практичною проблемою є аналіз існуючих методик визначення ефективності гасіння літій-іонних акумуляторів різними вогнегасними речовинами. Необхідність систематизації наявних підходів, виявлення їх переваг і недоліків, а також визначення напрямів удосконалення методик оцінювання зумовлена потребою підвищення рівня пожежної безпеки об'єктів, де використовуються літій-іонні акумулятори, і розроблення обґрунтованих рекомендацій щодо вибору ефективних засобів пожежогасіння.

Таким чином, дослідження, спрямоване на аналіз та узагальнення існуючих методик визначення ефективності гасіння літій-іонних акумуляторів вогнегасними речовинами, є актуальним та має важливе наукове і прикладне значення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Літій є одним з найлегших металів, який використовується в промисловості [1]. Дослідження

ефективності гасіння легких металів різними вогнегасними речовинами представлено у роботах [2-6]. У даних працях авторами розроблено рецептуру вогнегасних порошків для гасіння пожеж класу D, A, B, проведено успішне гасіння вогнищ пожеж класу D і B, що свідчить про ефективність розроблених порошків, а також розроблена технологія комбінованого гасіння пожеж класу D і A. Проблематика пожежної небезпеки літій-іонних акумуляторів упродовж останнього десятиліття набула значної уваги в роботах вітчизняних та зарубіжних науковців. У численних дослідженнях розглядаються механізми виникнення теплового розгону, особливості розвитку пожеж і вибухів літій-іонних батарей, а також токсикологічні та екологічні наслідки їх горіння. Значна частина наукових праць присвячена експериментальному вивченню процесів займання акумуляторів різної ємності та конструкції під впливом електричних, теплових і механічних факторів.

Дослідники з Китаю в роботі [7] описують причини займання Li-іон батарей (перезаряд, коротке замикання, механічні пошкодження, перегрів), вивчають ефективність різних засобів гасіння (вода та водяний туман, піни, сухі порошки, газові агенти (CO₂, інертні гази) аерозолі та спеціалізовані добавки) та зазначають потребу у розробці спеціалізованих вогнегасних засобів і стандартизованих методів гасіння саме для літій-іонних батарей.

Італійські вчені [8] провели випробування на одному літій-іонному елементі та наборі взаємопов'язаних елементів. Випробування проводилися з використанням полум'я пальника LPG потужністю приблизно 7,5 кВт. Використовувалися літій-іонні елементи EIG C020, і оцінювалася ефективність гасіння вуглекислим газом, піною, сухим порошком, чистою водою та водяним туманом. Результати випробувань показали, що найефективнішими є вода та піна. Оброблені елементи заряджалися до 50 % заряду. Експериментальні дослідження показали, що літій-іонні акумулятори мають високий ризик пожежі. Окислення металевого літію генерує спалах під час нагрівання акумулятора.

В роботі [9] описано проникнення гострих предметів в акумуляторну батарею, що призводить до короткого замикання та, отже, горіння, ймовірно, трапляється під час зіткнень електромобілів. Автори провели моделювання поведінки проникнення цвяхів в батарею. Під час розробки методики, щодо випробування вогнегасних речовин для гасіння літій-іонних акумуляторів одним із способів створення пожежі є пробиття акумулятора гострим предметом. Недоліком даного

методу ініціації горіння є неможливість забезпечення точної відтворюваності процесу пробиття акумулятора.

Науковці у роботі [10] наводять сучасний стан щодо ефективного гасіння пожеж електро-транспорту. Автори систематизують питання, аналізуючи літературу про пожежі, де літій-іонні акумулятори є критичним елементом, який може ініціювати пожежу. Також було проаналізовано методи гасіння пожежі, а також використані вогнегасні речовини.

У роботах низки авторів [11, 12] доведено, що традиційні засоби пожежогасіння не завжди забезпечують припинення теплового розгону та запобігання повторному займанню акумуляторів. Ефективність вогнегасних засобів суттєво залежить від режиму подавання вогнегасної речовини, конструкції батареї та умов експерименту [13, 14]. Дослідники [15] запропонували технологію раннього попередження та засіб гасіння пожежі для запобігання та контролю небезпеки систем зберігання енергії та узагальнили методи моніторингу зосереджуючись на п'яти аспектах: «акустика, тепло, сила, електрика та газ». Також важливим чинником, що буде впливати на пожежну небезпеку літій-іонних акумуляторів є їх тепловий розгін, зокрема, автори [16] встановили, що температура початку теплового вибуху для акумулятора, нагрітого циліндричним нагрівачем є нижчою, ніж для акумулятора, нагрітого електричною пічкою. Дослідивши вплив трьох ключових параметрів таких як положення нагрівання, площа та потужність, встановили, що більше іскор та викиду газу спостерігалось для акумулятора, нагрітого циліндричним нагрівачем, тоді як акумулятор, нагрітий електричною пічкою, спричиняв більший вибух та більше займання.

У наукових працях [17–20] показано, що ємність акумулятора і його відсоток заряду акумулятора буде мати безпосередній вплив на його тепловий розгін, виділення тепла, вуглекислого газу та втрату маси.

Аналіз публікацій показує, що більшість досліджень мають прикладний або вузькоспеціалізований характер і спрямовані на вивчення окремих аспектів гасіння літій-іонних акумуляторів.

Мета статті – провести аналіз існуючих методик з визначення ефективності гасіння пожеж літій-іонних акумуляторів різними вогнегасними речовинами з урахуванням специфіки розвитку теплового розгону, умов повторного займання та сучасних вимог пожежної безпеки, а також виявлення основних недоліків чинних підходів і обґрунтування напрямів удосконалення методик оцінювання вогнегасної ефективності для

підвищення рівня пожежної безпеки об'єктів цивільного та спеціального призначення.

Виклад основного матеріалу. Проведемо аналіз існуючих методик з визначення ефективності гасіння пожеж літій-іонних акумуляторів.

В Чеській методиці [21] описано вимоги до переносних вогнегасників, які ефективні для гасіння пожеж, спричинених літій-іонними батареями, а також методи випробувань, якими перевіряється така придатність та правила маркування продукції після успішних випробувань. На рис. 1 зображено процес гасіння літій іонного акумулятора згідно запропонованої Чеської методики [21].

В процесі гасіння літій-іонних акумуляторів проводили спостереження за температурою

горіння (рис. 2). Як видно з графіку, що максимальна температура горіння становить 400 °С.

Згідно методики процес гасіння відбувається після досягнення пікової температури (рис. 2), вогнегасна речовина подається в отвір кришки ємності де горить літій-іонна батарея і заповнює її. Дана методика не є ефективною для випробування вогнегасних речовин, адже літій-іонна батарея знаходиться в металевій ємності, яку заповнюють вогнегасною речовиною, для охолодження. Такий процес не потребує конкретної вогнегасної речовини, а достатньо ємність заповнити водою, таким чином досягнемо припинення процесу горіння.

У відомій методиці запропонованій в роботі [22] проводили гасіння літій-іонного модуля



Рис. 1. Модельне вогнище з випробування вогнегасних речовин для гасіння літій-іонних акумуляторів [21]

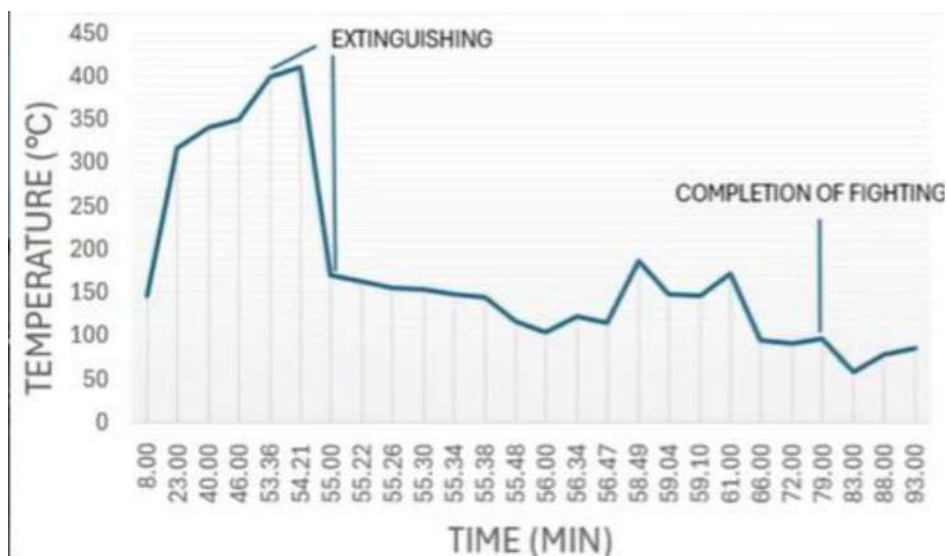


Рис. 2. Графік зміни температури залежності від часу горіння та під час подачі вогнегасної речовини [21]

енергетичною ємністю 5,7 кВт·год переносними вогнегасниками з різними вогнегасними речовинами. Згідно із методикою проведення експериментального дослідження, гасіння модуля відбувається після загорання сумарно 40–50 елементів, що дорівнює близько 10 % від загальної кількості елементів модуля. На момент гасіння орієнтовна площа горіння модуля становила 0,02–0,025 м², а температура горіння – понад 600 °С. Така методика не в повній мірі відповідає реальним умовам пожежі у зв'язку з відсутністю прошарку повітря між станиною та літій-іонним модулем [23]. Також, недоліком цієї методики, є відтворюваність процесу ініціації модуля нагріванням газовим пальником, що в процесі нагріву не може забезпечити однаковий тепловий потік при проведенні серії експериментів. Це обумовлено швидкістю вітрового потоку, що безпосередньо впливає на площу нагрівання літій-іонного модуля та

час і періодичність загорання елементів модуля від початку проведення експерименту.

В Нідерландській методиці [24] описується вимоги до переносних вогнегасників, що доповнюють NEN-EN 3-7:2004+A1:2007, для випробування їхньої придатності для гасіння пожеж літєвих акумуляторів обмеженого розміру, що використовуються в смартфонах, ноутбуках, електроінструментах, побутовій техніці, портативному медичному обладнанні та дронах. Згідно даної методи випробування проводяться з обмеженням номінальної ємності композитних плоских пакетних елементах не більшою 6750 мА (рис. 3).

Також вважається, що така методика буде ефективною для гасіння композитних циліндричних елементів такої ж або меншої номінальної ємності.

Щоб викликати тепловий розгін у елементах, набір із чотирьох елементів перезаряджається,



Рис. 3. Збірка експериментальної установки для проведення дослідження [24]



Рис. 4. Процес гасіння літій-іонних акумуляторів [24]



Рис. 5. Стан акумуляторних батарей після завершення процесу гасіння [24]



Рис. 6. Система високого тиску Cold Cut Cobra

доки вони не займаються, утворюючи видиме полум'я.

Процесі гасіння літій-іонних акумуляторів відповідно даної методики відображено на рисунку 4.

Після завершення гасіння необхідно спостерігати протягом 20 хв. чи не розпочнеться повторне загоряння рис. 5.

Проведення випробування вогнегасних речовин за даною методикою є не ефективним тому, що використовують акумулятори з ємністю, яка не створює пожежі з великою складністю гасіння.

В проєкті Європейського стандарту [25] описано вимоги до експлуатаційних характеристик портативних вогнегасників на додаток до вимог EN 3-7:2004+A1:2007, щоб випробувати їх для гасіння пожеж літій-іонних акумуляторів з обмеженою ємністю, що використовуються в:

- портативному електронному обладнанні (смартфони, ноутбуки);
- електроінструментах та побутових приладах;
- портативному медичному обладнанні;
- іграшках та радіокерованих об'єктах;
- безпілотних літальних апаратах;
- велосипедах.

У ньому також зазначено відповідне маркування.

Документ охоплює випробування на гасіння, масштабовані до типових ємностей портативних акумуляторів, і чітко виключає валідацію для великих ризиків, таких як тягові акумулятори транспортних засобів або стаціонарні системи накопичення енергії. Слід зазначити, що, як і метод [24] проєкт Європейського стандарту обмежує максимальну потужність літій-іонних акумуляторів, які піддаються гасінню значенням 600 Вт. Також, у проєкті стандарту чітко зазначено, що він не застосовується для тягових акумуляторів транспортних засобів або великих стаціонарних систем накопичення енергії.

В Шведській методиці [26] проводять дослідження з випробування система високого тиску Cold Cut Cobra (рис. 6).

Дана система призначена для пробивання будівельних конструкцій водяно-абразивним струменем та подачі тонкорозпиленої води для гасіння пожеж без доступу кисню.

Система Cold Cut Cobra – це вдосконалений засіб пожежогасіння, розроблений для підвищення як безпеки, так і ефективності. Використовуючи струмінь води надвисокого тиску, здатний досягати до 300 бар, система може пробивати практично будь-який будівельний матеріал. Змішуючи абразив у струмінь води, Cobra ефективно



Рис. 7. Практичне застосування Cold Cut Cobra

прорізає поверхню, не надаючи вогню додаткового кисню, допомагаючи його стримувати (рис. 7).

Після проколювання використовується лише вода, створюючи дрібний туман, який охолоджує гази, що утворюються внаслідок пожежі, та знижує температуру. Систему можна оснастити додатковими функціями, такими як насос для добавок або багатоцільова форсунка (MPN) для регульованих режимів розпилення, що робить її універсальною для різних потреб пожежогасіння.

Система Cobra розроблена для гнучкого встановлення на широкий спектр транспортних засобів, що робить її адаптованою до різних операційних потреб пожежно-рятувальних служб.

Методики оцінювання ефективності пожежогасіння, запропоновані різними авторами, суттєво відрізняються за критеріями результативності, тривалістю спостереження, параметрами теплового впливу та умовами повторного займання. Це ускладнює порівняння отриманих результатів і формування уніфікованих рекомендацій щодо вибору вогнегасних засобів.

У нормативних документах та стандартах, що регламентують випробування вогнегасників і вогнегасних речовин, питання гасіння пожеж літій-іонних акумуляторів або взагалі не розглядаються, або висвітлюються фрагментарно, без урахування специфічних фізико-хімічних процесів, притаманних таким пожежам. Особливо актуальною ця проблема є в умовах України, де, поряд із розвитком цивільних технологій, відбувається інтенсивне виготовлення та експлуатація безпілотних літальних апаратів із літій-іонними батареями в умовах підвищених ризиків пошкодження та займання.

Висновки. Таким чином, аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить про відсутність комплексного підходу до оцінювання ефективності гасіння літій-іонних акумуляторів та необхідність систематизації існуючих методик. На підставі виконаного дослідження, встановлено, що існує відмінність у процесі проведення

стандартизованих випробувань вогнегасних речовин для гасіння літій-іонних акумуляторів. На основі виявлених недоліків в існуючих методиках, встановлено ключові чинники, які будуть впливати на визначення ефективності гасіння акумуляторів, будуть:

- метод ініціації літій-іонних акумуляторів, що призводить до їх горіння (перезарядження, пробивання, механічне пошкодження);

- експериментальна установка для випробувань (акумулятори які піддаються гасінню знаходяться у підвішеному стані, поміщаються у закриту ємність, випробовуються окремі елементи акумуляторів, збірки з акумуляторів різних ємностей);

- засоби подачі вогнегасних речовин (відстань до об'єкту гасіння, засоби гасіння, параметри подачі вогнегасних речовин);

- час горіння акумуляторів з моменту їх ініціації, час гасіння, фіксація часу до можливого повторного загорання і встановлення необхідності продовження гасіння;

- тип акумуляторів, що піддаються випробуванням, відсоток їхнього заряду перед початком досліджень та максимальна потужність збірки акумуляторів.

Це зумовлює потребу в узагальненні наукових результатів, критичному аналізі застосовуваних методів випробувань і визначенні перспективних напрямів удосконалення методик оцінювання вогнегасної ефективності з урахуванням реальних умов експлуатації та сучасних загроз.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дослідження найлегшого металу. URL: <https://ssalloy-steel.com/uk/blog/lightest-metal/> (дата звернення: не вказано).

2. Kovalyshyn V., Marych V., Veselivskyi R., Kovalyshyn V., Lozynskyi R. Обґрунтування технології гасіння комбінованих пожеж за наявності легких металів чи фосфорних. *Пожежна безпека*. 2024. № 44. С. 30–40. DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.44.2024.04>

3. Kovalyshyn V., Marych V., Veselivskiy R., Kovalyshyn V., Chernetskiy V. Оптимізація рецептури вогнегасного порошку спеціального призначення для комбінованого гасіння пожеж класу А, В та D. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2023. № 2(16). С. 123–134. DOI: [https://doi.org/10.33269/nvz.2023.2\(16\).123-134](https://doi.org/10.33269/nvz.2023.2(16).123-134)
4. Дослідження хімічних речовин як складників вогнегасних порошків для гасіння легких металів. *Пожежна безпека*. 2018. № 29. С. 46–56. URL: <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/view/33>
5. Комбіноване гасіння пожеж класу D та А, В. *Пожежна безпека*. 2019. № 35. С. 30–34. DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.35.2019.05>
6. Вогнегасний порошок спеціального призначення для комбінованого гасіння пожеж класу D, А, В. Патент на корисну модель № 145068 Україна, МПК А62D 1/00; заявл. 02.12.2019; опубл. 25.11.2020, Бюл. № 22. 3 с.
7. Huang J., Jin J., Zhao L., et al. Review of fire extinguishing agents and fire suppression strategies for lithium-ion battery fire. *China Journal of Environmental Engineering*. 2024. Vol. 18, No. 11. P. 2121–2136.
8. Russo P., Di Bari C., Mazzaro M., De Rosa A., Morriello D. Effective fire extinguishing systems for lithium-ion battery. *Chemical Engineering Transactions*. 2018. Vol. 67. P. 727–732. DOI: <https://doi.org/10.3303/CET1867122>
9. Chiu K.-C., Lin C.-H., Yeh S.-F., Lin Y.-H., Chen K.-C. An electrochemical modeling of lithium-ion battery nail penetration. *Journal of Power Sources*. 2014. Vol. 254. P. 263.
10. Lesiak P., Pietrzela D., Mortka P. Methods used to extinguish fires in electric vehicles. *Safety & Fire Technology*. 2021. Vol. 58(2). P. 38–57.
11. 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*. 2022. Vol. 60. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10694-022-01278-3>
12. Majeed F., Jamal H., Kamran U., et al. Review – recent advances in fire-suppressing agents for mitigating lithium-ion battery fires. *Journal of The Electrochemical Society*. 2024. Vol. 171. DOI: <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ad5620>
13. Chang C., Wang R. Experimental investigation of thermal runaway behaviour and inhibition strategies in lithium iron phosphate batteries. *International Journal of Electrochemical Science*. 2024. Vol. 19. Article 100877. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2024.100877>
14. Xiao X., Chen B., Jin X., et al. Experimental study on the effect of synergistic extinguishing method based on liquid nitrogen on lithium-ion battery fire after thermal runaway. *Fire*. 2024. Vol. 7(12). Article 479. DOI: <https://doi.org/10.3390/fire7120479>
15. Wang K., Ouyang D., Qian X., et al. Early warning method and fire extinguishing technology of lithium-ion battery thermal runaway: A review. *Energies*. 2023. Vol. 16(7). Article 2960. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16072960>
16. Wang Z., Yang H., Li Y., et al. Thermal runaway and fire behaviors of large-scale lithium-ion batteries with different heating methods. *Journal of Hazardous Materials*. 2019. Vol. 379. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.06.007>
17. Wang Z., Ning X., Zhu K., et al. Evaluating the thermal failure risk of large-format lithium-ion batteries using a cone calorimeter. *Journal of Fire Sciences*. 2019. Vol. 37. P. 81–95. DOI: <https://doi.org/10.1177/0734904118816616>
18. Md Said M. S. B. Experimental study and numerical modelling of lithium-ion battery thermal runaway behaviour: дис. ... докт. філософії. Sheffield: The University of Sheffield, 2018.
19. Wei N., Zhang F., Zhang W., Li X. Comparative study on the thermal runaway characteristics of Li(NixCoyMnz)O₂ batteries. *Heliyon*. 2024. Vol. 10. Article e31203. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31203>
20. Kang R., Jia C., Zhao J., Zhao L., Zhang J. Effects of capacity on the thermal runaway and gas venting behaviors of lithium iron phosphate batteries induced by overcharge. *Journal of Energy Storage*. 2024. Vol. 84. Article 111523. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111523>
21. Metodika zkoušení hasicí směsi FRS EXcellent 1 při hašení požárů hořlavých kapalin, lehkých kovů a Li-ion baterií. Praha: VÚPO, 2025.
22. Havryliuk A. F., Yakovchuk R. S., Kovalyshyn V. V. Ефективність використання переносних вогнегасників при гасінні літій-іонних акумуляторів. *Пожежна безпека*. 2024. № 44. С. 58–66.
23. Havryliuk A. F. Розвиток наукових основ протипожежного захисту електричних колісних транспортних засобів (електромобілів): дис. ... д-ра техн. наук: 21.06.02. Львів, 2025. 395 с.
24. Portable fire extinguishers – Performance requirements, test methods and marking for suitability for extinguishing lithium battery fires (NTA 8133:2021+A1:2025).
25. Portable fire extinguishers – Part 11: Performance requirements, test method and marking for EN 3-7 extinguishers suitable for lithium-ion battery fires: prEN 3-11:2025. Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 2025.
26. Demonstration of extinguishing method for lithium-ion batteries: method application at different levels of aggregation – module, sub-battery, electric car pack and vehicle level. Karlstad: Swedish Civil Contingencies Agency (MSB), 2023.

REFERENCES

1. (n.d.). *Doslidzhennia nailehshoho metalu* [Study of the lightest metal]. Retrieved from: <https://sسالloy-steel.com/uk/blog/lightest-metal/> [in Ukrainian].
2. Kovalyshyn V., Marych V., Veselivskiy R., Kovalyshyn V., & Lozynskiy, R. (2024). *Obgruntu-*

vannia tekhnolohii hasinnia kombinovanykh pozhezh za naiavnosti lehkykh metaliv chy fosfornykh [Substantiation of technology for extinguishing combined fires in the presence of light metals or phosphorus]. *Pozhezhna bezpeka*, (44), 30–40. <https://doi.org/10.32447/20786662.44.2024.04> [in Ukrainian].

3. Kovalyshyn, V., Marych, V., Veselivskiy, R., Kovalyshyn, V., & Chernetskiy, V. (2023). *Optymizatsiia retseptury vohnehasnogo poroshku spetsialnogo pryznachennia dlia kombinovanoho hasinnia pozhezh klasu A, B ta D* [Optimization of formulation of special-purpose fire-extinguishing powder for combined extinguishing of class A, B, and D fires]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, 2(16), 123–134. [https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2\(16\).123-134](https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2(16).123-134) [in Ukrainian].

4. Kovalyshyn, V., Marych, V., Kyryliv, Y., Koshelenko, V., & Mirus, O. (2018). *Doslidzhennia khimichnykh rehovyn yak skladnykiv vohnehasnykh poroshkiv dlia hasinnia lehkykh metaliv* [Study of chemical substances as components of fire-extinguishing powders for light metals]. *Pozhezhna bezpeka*, (29), 46–56. Retrieved from: <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/view/33> [in Ukrainian].

5. Husar, B., Kovalyshyn, V., Marych, V., Lozynskiy, R., & Pastukhov, P. (2019). *Kombinovane hasinnia pozhezh klasu D ta A, B* [Combined extinguishing of class D and A, B fires]. *Pozhezhna bezpeka*, (35), 30–34. <https://doi.org/10.32447/20786662.35.2019.05> [in Ukrainian].

6. Kovalyshyn, V. V., Husar, B. M., Kovalyshyn, V. V., & Marych, V. M. (2020). *Vohnehasnyi poroshok spetsialnogo pryznachennia dlia kombinovanoho hasinnia pozhezh klasu D, A, B* [Special-purpose fire-extinguishing powder for combined extinguishing of class D, A, B fires] (Ukrainian Utility Model Patent No. 145068). [in Ukrainian].

7. Huang, J., Jin, J., Zhao, L., et al. (2024). Review of fire extinguishing agents and fire suppression strategies for lithium-ion battery fire. *China Journal of Environmental Engineering*, 18(11), 2121–2136.

8. Russo, P., Di Bari, C., Mazzaro, M., De Rosa, A., & Morriello, D. (2018). Effective fire extinguishing systems for lithium-ion battery. *Chemical Engineering Transactions*, 67, 727–732. <https://doi.org/10.33031/CET1867122>

9. Chiu, K.-C., Lin, C.-H., Yeh, S.-F., Lin, Y.-H., & Chen, K.-C. (2014). An electrochemical modeling of lithium-ion battery nail penetration. *Journal of Power Sources*, 254, 263.

10. Lesiak, P., Pietrzela, D., & Mortka, P. (2021). Methods used to extinguish fires in electric vehicles. *Safety & Fire Technology*, 58(2), 38–57.

11. Zhang, L., Jin, K., Sun, J., & Wang, Q. (2022). A review of fire-extinguishing agents and fire suppression strategies for lithium-ion batteries fire. *Fire Technology*, 60. <https://doi.org/10.1007/s10694-022-01278-3>

12. Majeed, F., Jamal, H., Kamran, U., et al. (2024). Review – recent advances in fire-suppressing agents for mitigating lithium-ion battery fires. *Journal*

of The Electrochemical Society, 171. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ad5620>

13. Chang, C., & Wang, R. (2024). Experimental investigation of thermal runaway behaviour and inhibition strategies in lithium iron phosphate batteries. *International Journal of Electrochemical Science*, 19, Article 100877. <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2024.100877>

14. Xiao, X., Chen, B., Jin, X., et al. (2024). Experimental study on the effect of synergistic extinguishing method based on liquid nitrogen on lithium-ion battery fire after thermal runaway. *Fire*, 7(12), Article 479. <https://doi.org/10.3390/fire7120479>

15. Wang, K., Ouyang, D., Qian, X., et al. (2023). Early warning method and fire extinguishing technology of lithium-ion battery thermal runaway: A review. *Energies*, 16(7), Article 2960. <https://doi.org/10.3390/en16072960>

16. Wang, Z., Yang, H., Li, Y., et al. (2019). Thermal runaway and fire behaviors of large-scale lithium-ion batteries with different heating methods. *Journal of Hazardous Materials*, 379. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.06.007>

17. Wang, Z., Ning, X., Zhu, K., et al. (2019). Evaluating the thermal failure risk of large-format lithium-ion batteries using a cone calorimeter. *Journal of Fire Sciences*, 37, 81–95. <https://doi.org/10.1177/0734904118816616>

18. Md Said, M. S. B. (2018). *Experimental study and numerical modelling of lithium-ion battery thermal runaway behaviour* (Doctoral dissertation, The University of Sheffield).

19. Wei, N., Zhang, F., Zhang, W., & Li, X. (2024). Comparative study on the thermal runaway characteristics of Li(NixCoyMnz)O₂ batteries. *Heliyon*, 10, Article e31203. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31203>

20. Kang, R., Jia, C., Zhao, J., Zhao, L., & Zhang, J. (2024). Effects of capacity on the thermal runaway and gas venting behaviors of lithium iron phosphate batteries induced by overcharge. *Journal of Energy Storage*, 84, Article 111523. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111523>

21. (2025). *Metodika zkouseni hasici smesi FRS EXcellent 1 pri haseni pozaru horlavych kapalín, lehkykh kovu a Li-ion baterii* [Methodology for testing extinguishing mixture FRS EXcellent 1 for fires of flammable liquids, light metals and Li-ion batteries]. Praha: VUPO.

22. Havryliuk, A. F., Yakovchuk, R. S., & Kovalyshyn, V. V. (2024). *Efektivnist vykorystannia perenosnykh vohnehasnykiv pry hasinni liti-ionnykh akumuliatoriv* [Efficiency of portable fire extinguishers in extinguishing lithium-ion batteries]. *Pozhezhna bezpeka*, (44), 58–66 [in Ukrainian].

23. Havryliuk, A. F. (2025). *Rozvytok naukovykh osnov protypozhezhnogo zakhystu elektrychnykh kolisnykh transportnykh zasobiv (elektromobiliv)* [Development of scientific foundations of fire

protection of electric vehicles] (Doctoral dissertation). Lviv [in Ukrainian].

24.(2025). *Portable fire extinguishers – Performance requirements, test methods and marking for suitability for extinguishing lithium battery fires (NTA 8133:2021+A1:2025)*.

25.(2025). *Portable fire extinguishers – Part 11: Performance requirements, test method and marking*

for EN 3-7 extinguishers suitable to be used on lithium-ion battery fires (prEN 3-11:2025). Brussels: European Committee for Standardization (CEN).

26.(2023). *Demonstration of extinguishing method for lithium-ion batteries: method application at different levels of aggregation – module, sub-battery, electric car pack and vehicle level*. Karlstad: Swedish Civil Contingencies Agency (MSB).

© В. В. Ковалишин, В. М. Марич, Р. Б. Веселівський, Вол. В. Ковалишин, Н. Р. Великий, Р. Я. Лозинський, Я. В. Геревич

Оглядова стаття

Дата першого надходження статті до видання: 02.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 29.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.48.2026.07>

А. Д. Кузик, Д. Р. Лозова

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0118-9493> – А. Д. Кузик

<https://orcid.org/0009-0001-0757-3288> – Д. Р. Лозова

✉ andrij_k@yahoo.com

АСПЕКТИ ВПЛИВУ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ НА ОБ'ЄКТИ, РОЗТАШОВАНІ У ЛІСАХ ТА НА ПРИЛЕГЛИХ ТЕРИТОРІЯХ

Проблема. Лісові пожежі не лише завдають збитків лісовому господарству, негативно впливають на навколишнє середовище та несуть загрозу людині, але й можуть поширитися на об'єкти, які розташовані у лісах та на прилеглих територіях. Внаслідок цього виникають вторинні пожежі, які мають негативні наслідки для економіки та довкілля, потребують залучення сил і засобів для ліквідації.

Мета. Метою роботи є аналіз проблеми впливу лісових пожеж на об'єкти та шляхів її вирішення в Україні та світі.

Методи дослідження. Методи досліджень включають аналітичний огляд законодавства України та наукових праць, присвячених проблемі впливу лісових пожеж на об'єкти, розташовані у лісах та на прилеглих територіях.

Основні результати дослідження. В Україні є низка законодавчих документів, які стосуються проблеми запобігання пожежам у природних екосистемах. Вони встановлюють протипожежні вимоги до деяких видів об'єктів у лісах та поруч з ними, зокрема житлових, виробничих та інфраструктурних. Ці вимоги стосуються зокрема відстаней до об'єктів, інженерних заходів з обмеження поширення пожеж, планів дій щодо реагування.

Наукові дослідження у зарубіжних джерелах описують проблему яка виникає у зоні контакту між створеною людьми інфраструктурою і дикою рослинністю та вводять спеціальний термін Wildland-Urban Interface (WUI). Низка досліджень стосуються аналізу лісових пожеж, які поширюються на житлову забудову, промислові об'єкти, зокрема зберігання горючих рідин, зріджених газів.

Актуальними напрямками досліджень процесів поширень лісових пожеж у WUI є їх моделювання. Застосовуються теоретичні та емпіричні моделі: від найпростіших, які описують процеси теплового випромінювання від фронту пожежі до моделей гідродинаміки.

Широко застосовують геоінформаційні системи для оцінювання ризиків пожеж у WUI.

Описано також результати експериментальних процесів нагрівання, займання та поширення горіння.

Висновки. Аналіз літературних джерел виявив, що проблема впливу лісових пожеж на об'єкти, розташовані у лісових масивах та межують з ними, є актуальною і не вирішеною в повній мірі, незважаючи на значну кількість досліджень.

Актуальним завданням є розробка методу аналізу небезпек переходу лісових пожеж на об'єкти та мінімізації такого впливу шляхом удосконалення протипожежного захисту лісів та об'єктів, виявлення загроз виникнення пожеж та реагування на них

Ключові слова: лісова пожежа, об'єкти, WUI, законодавство, поширення пожежі, безпека пожежі.

ASPECTS OF THE IMPACT OF FOREST FIRES ON OBJECTS LOCATED IN FORESTS AND ADJACENT TERRITORIES

Introduction. Forest fires not only cause damage to forestry, negatively affect the environment and pose a threat to humans, but can also spread to objects located in forests and adjacent territories. As a result, secondary fires arise, which have negative consequences for the economy and the environment, requiring the involvement of forces and means for their elimination.

Purpose. The purpose of the work is to analyze the problem of the impact of forest fires on objects and ways to solve it in Ukraine and the world.

Methods. Research methods include an analytical review of Ukrainian legislation and scientific works devoted to the problem of the impact of forest fires on objects located in forests and adjacent territories.

Results. In Ukraine, there are a number of legislative documents that address the problem of preventing fires in natural ecosystems. They establish fire protection requirements for certain types of objects in forests and near them, in particular residential, industrial and infrastructure. These requirements relate in particular to distances to objects, engineering measures to limit the spread of fires, and response action plans.

Scientific research in foreign sources describes the problem that arises in the contact zone between man-made infrastructure and wild vegetation and introduces the special term Wildland-Urban Interface (WUI). A number of studies concern the analysis of forest fires that spread to residential buildings, industrial facilities, in particular storage of flammable liquids, liquefied gases.

Current areas of research into the processes of forest fire spread in WUI are their modeling. Theoretical and empirical models are used: from the simplest ones that describe the processes of thermal radiation from the fire front to hydrodynamic models.

Geographic information systems are widely used to assess the risks of fires in WUI.

The results of experimental processes of heating, ignition and combustion spread are also described.

Conclusions. An analysis of literary sources revealed that the problem of the impact of forest fires on objects located in forest areas and bordering them is relevant and not fully resolved, despite a significant number of studies.

The current task is to develop a method for analyzing the dangers of forest fires spreading to objects and minimizing such impact by improving fire protection of forests and objects, identifying threats of fires and responding to them

Key words: forest fire, objects, WUI, legislation, fire spread, fire hazard.

Лісова пожежа – небезпечне явище у природній екосистемі. Її переважно шкідливий вплив на навколишнє середовище виявляється у викидах продуктів горіння в атмосферу, до яких належать і парникові гази, виділення значної кількості теплоти, знищення рослин, тварин та мікроорганізмів, що призводить до зменшення біорізноманіття, ерозії ґрунтів, зміни гідрологічного режиму територій. У разі перебування у лісі людей, негативні чинники пожежі можуть спричинити їх ураження та загибель. Проте нерідко горіння лісу спричиняє негативну дію на різноманітні об'єкти, розташовані в зоні впливу: всередині лісового масиву або поруч з ним. Внаслідок теплового випромінювання, конвективних потоків та іскор може виникнути ушкодження і займання таких об'єктів. Дим і продукти горіння, що поширюються у напрямку об'єктів, є небезпечними для осіб, що перебувають на цих об'єктах. Особливу загрозу становить лісова пожежа для об'єктів підвищеної безпеки та критичної інфраструктури.

Метою роботи є аналіз проблеми впливу лісових пожеж на об'єкти та шляхів її вирішення в Україні та світі.

Методи досліджень включають аналітичний огляд законодавства України та наукових праць, присвячених проблемі впливу лісових пожеж на об'єкти, розташовані у лісах та на прилеглих територіях.

Виклад основного матеріалу. Згідно із законодавством України об'єкт підвищеної безпеки – це комплекс підприємства, що включає будівлі, виробництва, окреме обладнання та джерела безпеки, розташовані в межах території такого об'єкта, який за результатами ідентифікації вважається об'єктом підвищеної безпеки відповідного класу [1].

Згідно з Порядком організації охорони і захисту лісів [2] є чіткі вимоги щодо деяких видів об'єктів у лісах та поруч з ними, зокрема:

- складів паливно-мастильних та інших горючих матеріалів,
- автозаправних станцій,

- вогнебезпечних виробництв,
- смітників,
- житлових приміщень,
- виробничих приміщень,
- промислових об'єктів,
- об'єктів інфраструктури.

Їх заборонено розміщувати ближче 100 м до межі хвойного лісу, 50 м – мішаного і 20 м – листяного лісу. Якщо такі об'єкти існують, то необхідно здійснювати додаткові заходи щодо недопущення пожеж на таких об'єктах: інженерного характеру – створювати подвійні мінералізовані смуги на межі лісу та навколо об'єкта, організаційного характеру – розробляти план дій у разі виникнення пожежі, що передбачає залучення відповідальних осіб, пожежних підрозділів лісового господарства та ДСНС України.

Цим же порядком забороняється спалювання залишків рослинності на ділянках між об'єктами і лісовим масивом, окрім контрольованого спалювання рослинності та контрольованих відпалів. Забороняється також здійснювати розміщення відходів у лісовому масиві, які можуть містити займісті матеріали. Під час будівництва та експлуатації комунікацій (дороги, газопроводи, нафтопроводи, лінії електропередач та ін.) та об'єктів у лісах потрібно дотримуватись правил пожежної безпеки, зокрема не залишати горючі матеріали, деревні залишки та джерела займання. Особливого порядку вимагається під час проведення робіт працівниками таких об'єктів у лісах, зокрема погодження з лісовими господарствами, наявності протипожежного обладнання та засобів гасіння, дій у разі виникнення.

Значної уваги щодо недопущення впливу лісових пожеж потребує розташування у лісах та поруч з ними складів боєприпасів. Основні вимоги та заходи щодо таких об'єктів наведені у Методичних рекомендаціях щодо зниження небезпеки впливу лісових пожеж на арсенали, бази і склади боєприпасів, що розташовані в лісових масивах [3]. Наведено інформацію про небезпечні фактори лісових пожеж, які можуть спричинити пожежі на складах боєприпасів, до яких належать хімічні, теплофізичні чинники, а у лісах, забруднених радіонуклідами – іонізуюче випромінювання. Способами переходу пожежі на склади боєприпасів є:

- теплове випромінювання від факела полум'я на горючі маревівали, що знаходяться на об'єкті,
- поширення фронту горіння на надґрунтовий покрив,
- поширення іскор та головень.

Запропоновано заходи щодо зниження впливу лісових пожеж на склади боєприпасів, зокрема

організаційні заходи, що встановлюють заборонену зону навколо таких об'єктів, взаємодію структур при виникненні таких пожеж; *заходи з попередження виникнення та поширення пожеж*, що регламентують утримання належного протипожежного стану лісу, створення протипожежних бар'єрів, доріг протипожежного призначення, пожежних водойм, *заходи реагування* – своєчасне виявлення та ліквідацію пожеж у лісах.

Оцінювання небезпеки виникнення і поширення лісових пожеж здійснюють з урахуванням класів природної пожежної небезпеки. Шкала для оцінювання природної пожежної небезпеки наведена у [Порядку], а також Правилах пожежної безпеки в лісах України [4] та Положенні про лісові пожежні станції [5]. Існують незначні відмінності у наведених документах, які загалом не впливають на використання таких шкал.

Однак шкала природної пожежної небезпеки враховує загрози на макрорівні, і не завжди стосується дрібніших деталей, які характеризують лісове середовище. У [6] проведено детальний аналіз екологічних та лісівничих особливостей лісового середовища, що впливають на виникнення та поширення пожеж, зокрема породного складу насаджень, віку, просторової структури (повнота, густина, ярусність), стану та запасу горючих матеріалів (підстилки, чагарників, дерев, опадів, сухих гілок та ін.). Встановлено закономірності процесів висушування горючих матеріалів, що призводять до зменшення вологості, встановлено температури займання горючих матеріалів рослинного походження. Вивчено закономірності впливу енергетичних геопотоків на пожежонебезпечні властивості лісового середовища, мікрокліматичні умови та їх вплив на горючі матеріали.

Важливим заходом запобігання та ліквідації лісових пожеж є оцінювання їх поведінки, що полягає у встановленні швидкості та напрямків поширення. З цією метою проводять моделювання процесів поширення лісових пожеж. На теперішній час існує багато моделей поширення лісових пожеж. Огляд основних моделей наведено у [7]. Всі моделі лісових пожеж поділено на теоретичні, емпіричні та напівемпіричні. Проаналізовано моделі клітинних автоматів, модель Ротермела, комп'ютерні моделі FIRETEC, WFDS, які є традиційними та широко застосовуються у різних країнах. Описано і інші сучасні моделі поширення пожеж, які базуються на генетичному алгоритмі, машинному навчанні та штучному інтелекті. Наголошено на важливості моделей поширення пожеж на територіях, де співіснують лісові горючі матеріали і штучні споруди міського середовища. Порівнянню різних моделей поширення пожеж

присвячено роботу [8]. На основі відомих моделей МакАртура, Ротермелла, Александера та Ванг Схенгфей запропоновано багатомодельний метод моделювання поширення лісових пожеж (FIRER), який показує час горіння, периметр, площу горіння, площу перекриття та швидкість поширення пожеж. Цей метод являє собою великомасштабну модель поширення вогню з високою роздільною здатністю, засновану на поширенні вогню у восьми напрямках на регулярній сітці 30 м.

Численні наукові дослідження присвячені аналізу пожеж, що виникли в природних екосистемах та поширилися на різноманітні житлові та промислові об'єкти. У багатьох зарубіжних наукових працях виокремлюють відповідні зони контакту між створеною людьми інфраструктурою і дикою рослинністю та вводять спеціальний термін Wildland-Urban Interface (WUI). Безпосередньо прилеглими до міської забудови і органічно пов'язаними з нею є сади і парки. У багатьох містах України, Європи та інших континентів є історично сформовані зони зелених насаджень, які забезпечують комфорт і естетично доповнюють міський архітектурний ландшафт. Наприклад, у [9] наведено історичний нарис та опис садів і парків Львова. Зміни клімату, посуха та інші чинники можуть негативно впливати на рослинність, що призведе до збільшення пожежної небезпеки, а у разі її виникнення – поширення на розташовані об'єкти у місті.

Аналіз впливу лісових пожеж на взаємодію між природним середовищем і людиною наведений у [10]. У Канаді нещодавні пожежонебезпечні сезони продемонстрували загрозу лісових пожеж у зонах WUI, які характеризуються змішуванням або межуванням лісових горючих матеріалів з житловими, промисловими та інфраструктурними об'єктами. Дослідження поєднує просторові та демографічні джерела інформації для оцінки

поточного та майбутнього впливу лісових пожеж, що відображається в інтервалах повторних пожеж Fire Return Intervals (FRI) для зон WUI та населення по всій території Канади. WUI охоплює 17,3 % площі лісів Канади. Виявлено, що 19,4 % території мають $FRI \leq 250$ років, але до кінця століття цей показник може зрости до 28,8 %–43,3 %. Приблизно 12,3 % населення Канади проживає на межі природного середовища та міста (WUI), що включає 32,1 % населення корінних народів. На теперішній час 17,8 % населення WUI у заповідниках піддається $FRI \leq 250$ років, порівняно з лише 4,7 % решти населення WUI. До 2100 року ці пропорції можуть досягти 39,3 % та 17,4 % відповідно за менш оптимістичних кліматичних сценаріїв.

Аналіз однієї з найбільших пожежі з катастрофічними наслідками з точки зору кількості втрачених споруд та економічних збитків у Південній Африці, спричиненої WUI – пожежі у Найсні 2017 року проведено у [11]. Дані для аналізу базуються на аеророзвідці, проведеній одразу ж після події, даних геолокації, що ідентифікує зруйновані будинки, супутникових знімках та наземних дослідженнях. Вивчено механізми поширення вогню, ефективність протипожежних смуг, вплив типів дахів та стін, рослинності та погодних умов. Поєднання таких чинників, як сильна посуха та екстремальні пожежні погодні умови, призвели до знищення будинків на відстані до 1 км всередині зони WUI. Висока швидкість вітру спричинила проходження вогнем природних та штучних перешкод (річки та автомагістралі), що призвело до виникнення кількох вторинних пожеж. Вид будівельних матеріалів та наявність рослинності, вплинули на живучість будинків. Горючі матеріали (солома та деревина) зумовили більшу вразливість будинків до пошкодження вогнем. Виявлено, що в районах з більшою кількістю знищених споруд горючим матеріалом рослинного походження

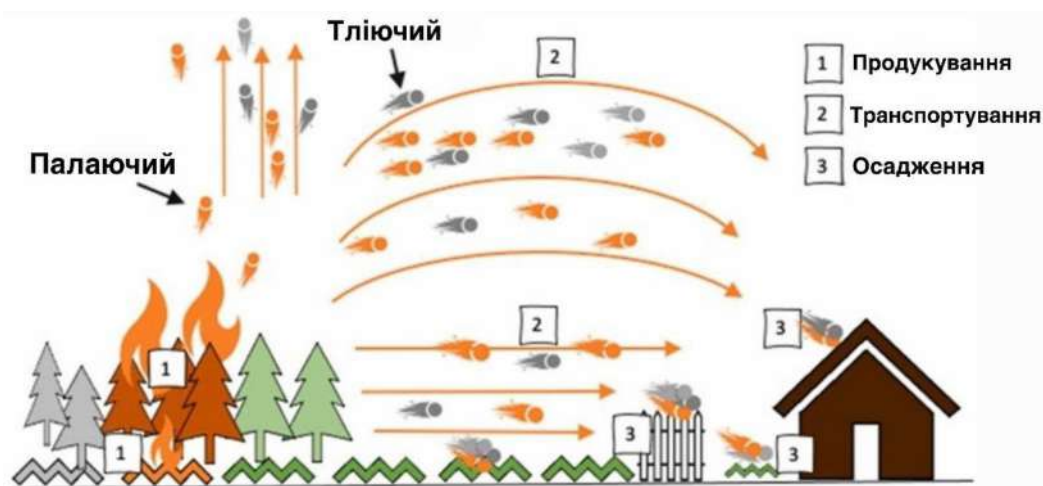


Рис. 1. Поширення лісової пожежі на забудову [12]

були густі, легкозаймісті насадження чужорідної інвазивної рослинності.

Механізми поширення лісових пожеж на забудову та теплові потоки проаналізовано у [12]. Розглянуто два сценарії: 1) перехід лісових пожеж до пожеж всередині міської забудови у зоні WUI і 2) поширення вогню в міських умовах. Перший сценарій вивчає вплив лісових пожеж на забудоване середовище, зокрема поширення шляхом контакту з полум'ям лісової пожежі та конвекцією, поширення пожежі внаслідок теплового випромінювання від фронту лісової пожежі та поширення твердих розжарених часток внаслідок горіння рослинних матеріалів (рис. 1).

Другий сценарій досліджує вплив споруд на інші споруди внаслідок пожежі в поселеннях внаслідок контакту з полум'ям та конвекції, теплового випромінювання між будівлями та твердих часток від горіння будівельних матеріалів.

Заслужують уваги моделі поширення пожеж у природному середовищі та забудові міст. Прикладом фізичної моделі WFDS (Wildland-Urban Fire Dynamic Simulator), що дає можливість вивчити такі процеси у WUI, наведений у [13]. Він ілюструє результати моделювання пожежі на громаду (рис. 2). Цей та інший приклад (рис. 3) наведений і у [14].

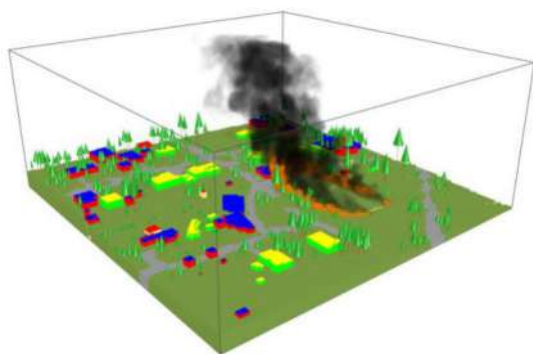


Рис. 2. Моделювання у WFDS поширення низової пожежі на будинки громади у зоні контакту між створеною людьми інфраструктурою і дикою рослинністю (Wildland-Urban Interface) [13, 14]

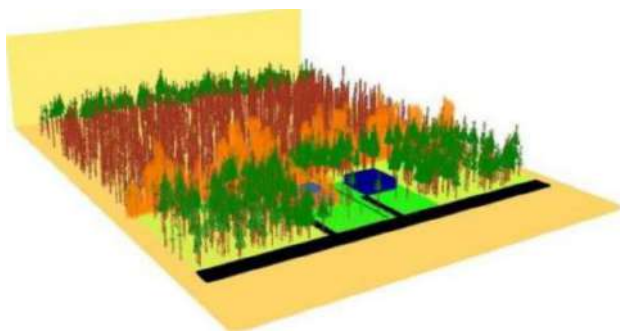


Рис. 3. Моделювання поширення лісової пожежі на будівлі у зоні контакту між створеною людьми інфраструктурою і дикою рослинністю (Wildland-Urban Interface) [14]

У роботі [15] розроблено модель поширення вогню на основі гетерогенної моделі клітинних автоматів для великомасштабних складних зон перебування природного середовища та міста (WUI). Модель інтегрує модель лісової пожежі та модель пожежі будинку на основі принципів передачі тепла та емпіричної статистики. Розроблено комп'ютерну програму на основі цієї моделі поширення вогню для перевірки її ефективності. Для перевірки адекватності розглянуто реальну пожежу WUI у Каліфорнії, проведено порівняльні симуляційні експерименти на основі запропонованої програми та поширеного програмного забезпечення для моделювання лісових пожеж FlamMap6. Результати вказують на ефективність, своєчасність та достатню точність симуляції, що буде ефективною для прийняття рішень у подібних надзвичайних ситуаціях.

Одним із важливих завдань щодо мінімізації впливу лісових пожеж на об'єкти є планування заходів щодо дотримання протипожежних вимог, виявлення таких пожеж, оцінювання небезпеки поширення. У [16] наведено розроблені етапи проєктів захисту об'єктів підвищеної небезпеки у Івано-Франківській області від впливу лісових пожеж. Ці етапи передбачають аналіз супутникової інформації та картографування об'єктів і лісових масивів, аналіз відстаней від лісів до об'єктів, врахування крутих схилів, з рослинністю, швидкість поширення якими є вища, ніж на рівнині. У дослідженні не виявлено проблем, пов'язаних з близькістю розташування таких об'єктів до лісових масивів.

Проблема поширення лісових пожеж на міські території наведена у спеціальному випуску журналу Fire and Materials [17]. Оглядова стаття стосується напрямів досліджень у цій сфері, зокрема питань стандартизації у сфері великих зовнішніх пожеж ISO TC 92, оцінюванню збитків від пожеж рослинності у Норвегії, впливу на ґрунти і водні ресурси, дії теплового випромінювання на об'єкти інфраструктури, зокрема паливні резервуари, поширення диму і твердих часток як забруднювачів, що викликає проблеми зі здоров'ям, процесам займання і поширення горіння лісовими та декоративними рослинами, а також захисту будівель від пожеж з використанням неорганічної затверділої піни та модернізації конструкцій пожежостійкими матеріалами.

У роботі [18] наведено результати досліджень місць займання у житловому будинку внаслідок лісової пожежі, досліджено теплову дію пожежі та сформульовано принципи захисту таких будівель від пожеж. Встановлено, що понад 60 % пожеж у житлових приміщеннях були безпосередньо пов'язані з поширенням вогню. Близько 80 %

починалися на дахах, а також у дверях і вікнах. Понад 90 % будинків, побудованих з кам'яними стінами та дерев'яними дахами та перекриттями, були набагато більш вразливими до пожежі, ніж залізобетонні конструкції. Запропоновано використовувати найсуворіші вимоги вогнезахисту елементів конструкцій.

Вплив теплового випромінювання фронту лісової пожежі на поверхню резервуарів з паливом досліджено у низці робіт. Одним із завдань підвищення рівня пожежної безпеки резервуарів для зберігання пального є визначення безпечної відстані для запобігання займанню. Його вирішенню присвячена робота [19], у якій звернута увага на те, що резервуари з паливом переважно розташовують на межі підприємств, а тому існує загроза займання від пожеж у природних екосистемах. Розглянуто такі види пожеж: трав'яна, пожежа чагарників і верхова пожежа для дерев висотою, 5, 10, 15, 20 і 25 м. Запропоновано методику оцінювання безпечної відстані, яку порівняно з існуючими нормами.

Подібну проблему розглянуто і у [20] щодо впливу лісових пожеж на малі і середні резервуари із зрідженим газом на цивільних і промислових об'єктах. Описано експериментальні дослідження, у яких фронт лісової пожежі був змодельований сталеву стіною розміром 3×8 м з палинками, у які надходив природний газ. Тепловий потік діяв на резервуар зрідженого газу об'ємом $2,3 \text{ м}^3$, виготовлений із сталі товщиною стінок 6,1 мм. Проведено також чисельне моделювання у ANSYS розв'язуванням систем диференціальних рівнянь маси, імпульсу та енергії в рідині та сталевій стінці резервуара.

Для кількісної оцінки вразливості резервуарних парків до дії випромінювання, спричиненого лісовою пожежею проведено дослідження [21]. Запропонована методологія базується на динамічному дереві подій, що враховує теплове випромінювання від лісових пожеж та пов'язані з ними каскадні сценарії. Застосування методології потребує таких даних моделювання сценарію лісової пожежі: форма полум'я, розміри полум'я, випромінювальна здатність полум'я та тривалість пожежі. Запропоновано використовувати спрощений підхід [19], оскільки він дає можливість характеризувати фронт пожежі на основі типу рослинності, що оточує промислову зону. Для моделювання фронту пожежі використовується модель суцільного полум'я у формі прямокутної поверхні зі сторонами L_f (довжина полум'я) і W_f (ширина фронту пожежі), нахиленої під кутом θ до горизонтальної поверхні, з випромінювальною здатністю E_{wf} (рис. 4).

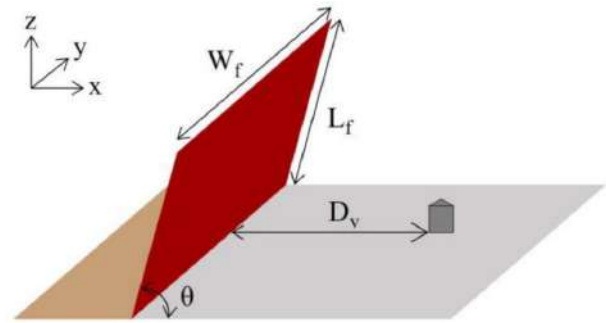


Рис. 4. Форма та розміри полум'я для моделювання фронту лісової пожежі [21]: L_f – довжина полум'я, W_f – ширина фронту пожежі, D_v – відстань між лісовою пожежею та резервуаром, θ – кут нахилу полум'я фронту пожежі

Процеси теплового випромінювання спричиняють поширення тепла у конструкціях. Їх моделювання описано у багатьох роботах. Зокрема у [22] отримані аналітичний метод моделювання поширення тепла у багат шарової пластини та порожнистому циліндрі за умов ідеального теплового контакту між шарами. Запропонований метод дає можливість описати температуру всередині багат шарових плоских будівельних конструкцій, що використовуються у будівлях (стіни, дах), а також у резервуарах для зберігання нафтопродуктів і зрідженого газу циліндричної форми.

Зона контакту між створеною людьми інфраструктурою та дикою рослинністю має тенденцію до збільшення в усьому світі та має прямий зв'язок з ризиком лісових пожеж. Антропогенна діяльність збільшує ризик лісових пожеж, які можуть мати катастрофічні наслідки для майна та землекористування, а також становити серйозну загрозу для життя і здоров'я людей. Дослідженню просторових закономірностей таких зон і місць виникнення лісових пожеж у Галісії (Іспанія) присвячена робота [23]. Просторово розмежовано та класифіковано зони контакту між створеною людьми інфраструктурою та дикою рослинністю за інтенсивністю людської присутності з урахуванням просторового розташування будівель. Також класифіковано зони за фрагментацією лісів, та встановлено щільності займання лісових пожеж. Встановлено, що більше половини забудованої території розташовано у таких зонах і що пожежі у них виникають вдвічі частіше, ніж за їх межами. Найвища частота природних пожеж спостерігається в безлісих районах зон, а найнижча щільність пожеж пов'язана з ізольованими будівлями. Райони з дуже щільними скупченнями будівель, оточених лісовими масивами, (приміські райони) мають найвищу щільність займання. Це вимагає розробки та реалізації планів захисту людського життя, майна та економічної діяльності.

Окремі дослідження стосуються вивчення дії вогню на будівельні конструкції та їх елементи. У [24] оцінено вогнестійкість покрівельних систем з малим ухилом, які поширені у комерційних та промислових будівлях. Досліджено чотири рішення для покрівельних покриттів, що поєднують два типи водонепроникних мембран (полівінілхлорид (ПВХ) та термопластичний поліолефін (ТПО)) з двома різними ізоляційними шарами (мінеральною ватою та поліізоціануратом (PIR)). Випробування в лабораторних умовах базувалися на методі CEN/TS 1187-Test 1 та оцінюванні за критеріями EN 13501-5 BROOF(t1). Моделювалося потрапляння на поверхню горючих фрагментів, які розміщувалися в корзині на поверхні елементів даху. Зразки конструкцій розміщувалися під кутами $1,41^\circ$ та 15° і досліджувалися за двох вітрових умов: без вітру та з дією вітру швидкістю $1,5 \text{ м/с}$ (рис. 5).

У дослідженні оцінювався вплив ухилу даху, розташування стиків, типу мембрани, теплоізоляційного шару та вітру на поширення полум'я та температурні профілі. Результати показали, що ТПО-мембрани, особливо в поєднанні з PIR-ізоляцією, значно збільшують поширення полум'я та тривалість горіння. І навпаки, ПВХ-мембрани продемонстрували добру вогнестійкість, обмежували поширення полум'я та самогасали за різних умов випробувань. Тому існує необхідність ретельного вибору покрівельних компонентів, особливо в зонах високого ризику WUI, та акцентує на важливість впливу вітру під час подібних вогневих випробувань.

У зонах між лісом і будівлями часто встановлюють трансформаторні підстанції. Однак, займістість трансформаторної оливи створює значні проблеми пожежної безпеки в забудованому середовищі. Лісові пожежі можуть серйозно вплинути на трансформатори через термічні пошкодження, деградацію ізоляції, структурні порушення та підвищений ризик пожежі. І навпаки, пожежі в басейнах трансформаторної

оливи також можуть посилити лісові пожежі через конвективні та радіаційні механізми теплопередачі. Цим питанням присвячені дослідження пожежної небезпеки трансформаторних оливи у резервуарах [25]. Проведено серію експериментів з пожежами у басейнах діаметром від $0,05 \text{ м}$ до $0,5 \text{ м}$, аналізуючи критичні параметри: масова швидкість горіння, геометрія полум'я та температура полум'я. Отримані результати порівняно з результатами традиційних вуглеводневих горючих матеріалів – бензину та дизельного палива. Для моделювання використовували MATLAB для визначення особливостей геометрії полум'я (висота, зони та площа) та Fire Dynamics Simulator (FDS) для моделювання пожеж. Розроблена математична модель теплового потоку, яка перевірена на відповідність результатам моделювання у FDS.

Вирішенню проблеми пожеж на межі лісу і промислових підприємств присвячено роботу [26]. Проведено огляд випадків пожеж, спричинених лісовими та іншими природними пожежами з 1997 до 2022 року. У роботі наведено карту з розташуванням такого межування для світу. Встановлено, що у Європі Німеччина, а у Азії Китай і Японія мають найбільші площі територій такого межування. Промислові об'єкти, які знаходяться на такій території та містять небезпечні матеріали, повинні враховувати ризики лісових пожеж та включати їх до кількісної оцінки ризиків.

Дослідження з використанням картографічних методів, за допомогою яких аналізують межування вкритих рослинністю частин поверхні та що знаходяться у користуванні, описані у [27]. Для використання у випадку пожеж у Європі створено карту на основі даних Corine Land Cover 2006 (CLC). Запропоновано метод, який складається з двох кроків: 1) просторове розташування та протяжність європейських зон пожежонебезпечних зон на межі рослинності і міського середовища картографуються в континентальному масштабі; 2) емпіричні дані перевіряються статистично на наявність будь-яких регіональних закономірностей

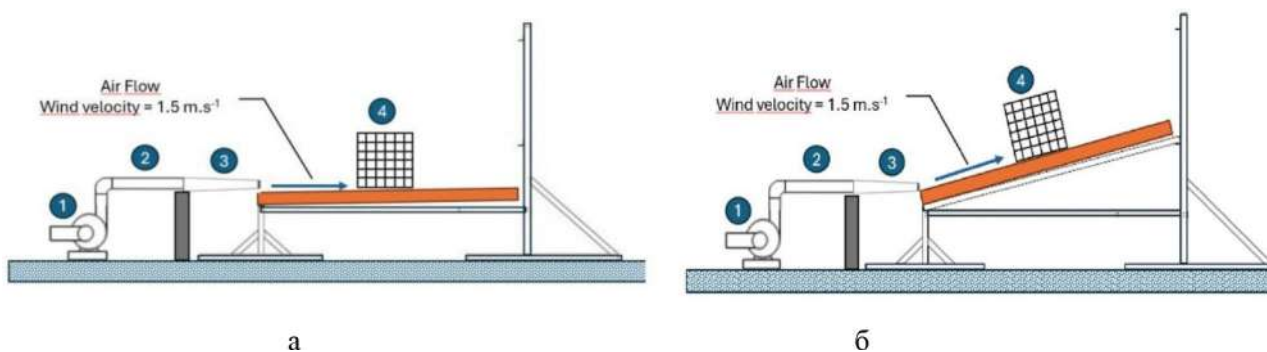


Рис. 5. Схема експериментальних випробувань за дії вітру: 1 – вентилятор, 2 – повітропровід діаметром 120 мм, 3 – перехідник, 4 – корзина з горючим матеріалом [24]; а – кут нахилу $1,41^\circ$; б – кут нахилу 15°

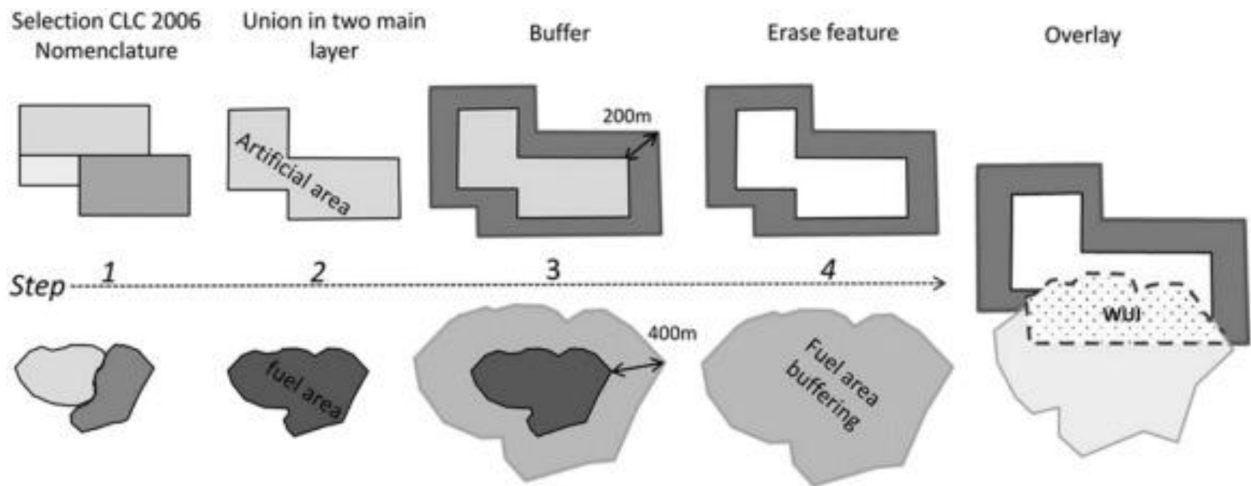


Рис. 6. Графічне представлення геопросторового аналізу для створення карти пожежонебезпечних зон переходу пожеж у природних екосистемах на створені людиною об'єкти [27]

виникнення великих пожеж у межах цих пожежонебезпечних зон. Обробка геопросторових даних проводиться у декілька кроків (рис. 6).

На першому кроці вибирають всі класи покриття земної поверхні у CLC, які створені людиною та є рослинним горючим матеріалом відповідно. На другому кроці відібрані класи об'єднують у два основні шари. На третьому кроці створюють буфер 200 м навколо створених людиною областей та 400 м навколо областей з рослинністю. На четвертому кроці два буферизовані шари даних накладають один на одного, щоб ідентифікувати області, що перекриваються та є пожежонебезпечними зонами переходу пожеж у природних екосистемах на створені людиною об'єкти.

Для аналізу загроз доцільно розрізняти ділянки, вкриті рослинністю, за пожежною небезпекою, яка залежить не лише від породного складу, але й багатьох інших чинників, які змінюються з часом. Тому зважаючи на зростаючу загрозу лісових пожеж високої інтенсивності в районах між дикою природою та міськими районами Середземномор'я (WUI) у [28] вказано на необхідність розробки ефективних стратегій оцінки та управління ризиками пожеж. Знайдена доступність космічних гіперспектральних даних дає значні можливості для оцінювання інтенсивності пожеж, а Національні лісові інвентаризації пропонують набори даних, пов'язані з рослинністю та запасами горючого матеріалу, що є важливим для формування планів і стратегій лісових служб. Запропоновано з метою удосконалення виявлення загроз пожеж в районах між дикою природою та міськими районами Середземномор'я поєднати космічні гіперспектральні дані PRISMA та дані іспанської Національної лісової інвентаризації. Запропонована методологія має з етапи: 1) оцінка інтенсивності лісової пожежі в локальному

масштабі за допомогою гіперспектральних даних PRISMA та багатоетапного спектрального аналізу у польових умовах; 2) розробка карти ймовірності високоінтенсивних лісових пожеж у регіоні на основі екстраполяції прогностичної моделі випадкового лісу, каліброваної на основі оцінок серйозності пожеж, даних NFI та топографічно-кліматичних змінних у локальному масштабі; 3) ідентифікація та характеристика зон, які можуть становити небезпеку в районах між дикою природою та міськими районами з високою ймовірністю та значною серйозністю пожеж у разі їх виникнення шляхом об'єднання інформації. Результат реалізації методології для території Середземномор'я Іспанії наведено на рис. 7.

Лісові пожежі на теперішній час частішають, посилюються в умовах кліматичних змін та переходять з природного середовища на міські території (WUI). Вони є основною причиною економічних збитків в усьому світі. Тому у роботі [29] акцентовано на наявність потреби в покращенні моделей пожеж у WUI для прогнозування їх масштабів, розуміння процесів поширення через забудоване середовище, виявлення та оцінки вразливостей окремих будівель та пом'якшення наслідків. Хоча існує значна кількість моделей поширення пожеж у природних екосистемах та у міських умовах, у моделюванні пожеж в WUI досягнуто незначного прогресу. Це пов'язано з тим, що під час таких пожеж згорає складна суміш горючих матеріалів рослинного походження та забудованого середовища. Запропоновано емпіричний підхід для розуміння того, як лісові пожежі можуть «поширюватися» у забудоване середовище, оцінюючи ймовірність знищення будівлі внаслідок пожеж, спричинених пожежами, що виникатимуть під час пожеж. Враховуються характеристики лісової пожежі під час її потрапляння у забудоване

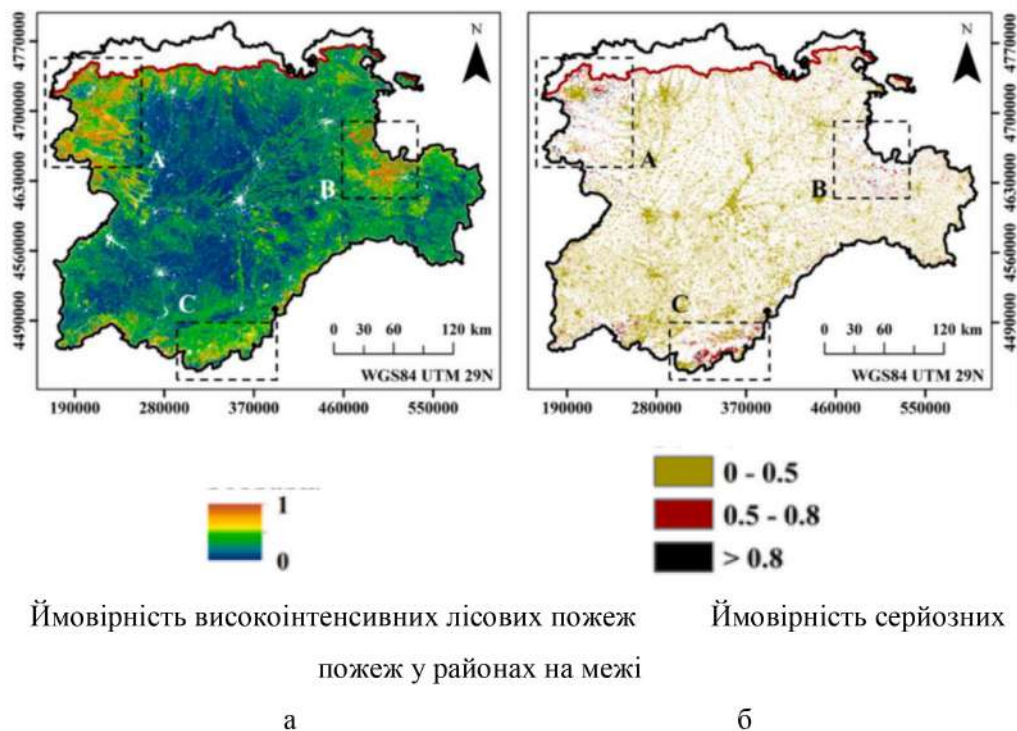


Рис. 7. Прогнози ймовірності високої інтенсивності пожеж у кліматичних районах середземноморського типу Кастильї та Леона (а); Розташування зон пожежонебезпечних зон між дикою природою та міськими районами та ймовірність високої інтенсивності пожеж. Детальне збільшення виділених на карті трьох гарячих точок: А – північний захід; В – схід; С – південь [28]

середовище, просторове розташування горючих матеріалів у будівлях та зелених насадженнях, а також деталі конструкції будівель.

Висновки. Аналіз літературних джерел виявив, що проблема впливу лісових пожеж на об'єкти, розташовані у лісових масивах та межують з ними, є актуальною і не вирішеною в повній мірі, незважаючи на значну кількість досліджень.

Вагомими чинниками впливу лісових пожеж на об'єкти є пожежонебезпечні властивості лісового середовища, які є динамічними, залежать від природних особливостей насаджень, погодно-кліматичних умов та впливають на параметри пожежі, розміри та стан буферних зон, які перешкоджають поширенню горіння на об'єкти, а також особливості протипожежного облаштування об'єктів та наявності пожежонебезпечних речовин.

Для зменшення ризиків пожеж на таких об'єктах необхідні подальші дослідження, спрямовані на встановлення закономірностей

поширення лісових пожеж на ці об'єкти та їх урахування у протипожежному захисті.

Актуальним завданням є розробка методу аналізу небезпек переходу лісових пожеж на об'єкти та мінімізації такого впливу шляхом удосконалення протипожежного захисту лісів та об'єктів, виявлення загроз виникнення пожеж та реагування на них.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Закон України: Про об'єкти підвищеної небезпеки *Відомості Верховної Ради України* (ВВР), 2001, № 15, 73 с. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2245-14#Text>.
2. Постанова Кабінету Міністрів України: Про затвердження Порядку організації охорони і захисту лісів від 20 травня 2022 р. № 612. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/612-2022-%D0%BF#top>
3. Наказ Міністерства надзвичайних ситуацій України: Про затвердження Методичних

- рекомендацій щодо зниження небезпеки впливу лісових пожеж на арсенали, бази і склади боєприпасів, що розташовані в лісових масивах 25.08.2011 № 890. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0890735-11#top>
4. Наказ Державного комітету лісового господарства України: Про затвердження Правил пожежної безпеки в лісах України 27.12.2004 № 278. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0328-05#Text>
5. Наказ Державного комітету лісового господарства України: Про затвердження Положення про лісові пожежні станції 28.12.2005 N 526. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0047-06#Text>
6. Кузик А. Д., Еколого-лісівничі основи пожежної безпеки лісів Малоого Полісся. Монографія. Львів : Сполом, 2019. 493 с.
7. Singh H., Ang L. M., Lewis T., Paudyal D., Acuna M., Srivastava P. K., Srivastava S. K., Trending and emerging prospects of physics-based and ML-based wildfire spread models: A comprehensive review. *Journal of Forestry Research*. 2024. Vol. 35(1). 135. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11676-024-01783-x>
8. Ning J., Liu H., Yu W. Deng, J. Sun, L. Yang, G. Yu H., (2024). Comparison of different models to simulate forest fire spread: A case study. *Forests*. Vol. 15(3). 563. DOI: <https://doi.org/10.3390/f15030563>
9. Кучерявий В. П., Сади і парки Львова. Львів : Світ, 2008. 359 с.
10. Erni S., Johnston L., Boulanger Y., Manka F., Bernier P., Eddy B., Gauthier S., Exposure of the Canadian wildland–human interface and population to wildland fire, under current and future climate conditions. *Canadian Journal of Forest Research*. 2021. Vol. 51(9). Pp. 1357–1367. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0422>
11. Quiroz N. F., Gibson L., Conradie W. S., Ryan P., Heydenrych R., Moran A., Walls R., Analysis of the 2017 Knysna fires disaster with emphasis on fire spread, home losses and the influence of vegetation and weather conditions: A South African case study. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2023. Vol. 88. 103618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2023.103618>
12. Filkov A. I., Tihay-Felicelli V., Masoudvaziri N., Rush D., Valencia A., Wang Y.,... Tam W. C. A review of thermal exposure and fire spread mechanisms in large outdoor fires and the built environment. *Fire safety journal*. 2023. Vol. 140. 103871. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103871>
13. Morvan D. Physical phenomena and length scales governing the behaviour of wildfires: a case for physical modelling. *Fire technology*. 2011. № 47. Pp. 437–460. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10694-010-0160-2>
14. Mell W., McNamara D., Maranghides A., McDermott R., Forney G., Hoffman C., Ginder M., Computer modelling of wildland-urban interface fires. *Fire & Materials*, San Francisco, CA, 31 Jan – 2 Feb 2011. P. 12.
15. Jiang W., Wang F., Fang L., Zheng X., Qiao X. Li Z., Meng Q. Modelling of wildland-urban interface fire spread with the heterogeneous cellular automata model. *Environmental Modelling & Software*. 2021. Vol. 135. 104895. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104895>
16. Стародуб Ю. П., Урсуляк П. П., Розробка етапів проектів впливу лісових пожеж на об'єкти підвищеної небезпеки на прикладі Івано-Франківської області. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2011. № 5. С. 32–38. URL: https://ludubgd.edu.ua/sites/default/files/files/5_2.pdf
17. Manzello S. L., Hofmann A., Editorial on Special Issue on Wildland–Urban Interface (WUI) Fires. *Fire and Materials*. 2025. Vol. 49. Pp. 509–511. DOI: <https://doi.org/10.1002/fam.3308>
18. Arruda M. R. T., Bicelli A. R., A. Branco F., Ignition locations and simplified design guidelines for enhancing the resilience of dwellings against wildland fires. *Fire*. 2024. Vol. 7(2). 40. DOI: <https://doi.org/10.3390/fire7020040>
19. Ricci F., Scarponi G. E., Pastor E., Planas E., Cozzani V. Safety distances for storage tanks to prevent fire damage in Wildland-Industrial Interface. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021. Vol. 147. Pp. 693–702. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.01.002>
20. Scarponi G. E., Landucci G., Heymes F., Cozzani V. Experimental and numerical study of the behavior of LPG tanks exposed to wildland fires. *Process Safety and Environmental Protection*. 2018. Vol. 114. Pp. 251–270. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.12.013>
21. Ricci F., Misuri A., Scarponi G. E., Cozzani V., Demichela M., Vulnerability assessment of industrial sites to interface fires and wildfires. *Reliability Engineering & System Safety*. 2024. Vol. 243. 109895. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2023.109895>
22. Tatsiy R. M., Pazen O. Yu., Vovk S. Ya., Ropyak L. Ya., & Pryhorovska T. O., Numerical study on heat transfer in multilayered structures of main geometric forms made of different materials. *Journal of the Serbian society for computational mechanics*. 2019. Vol. 13(2). Pp. 36–55. DOI: <https://doi.org/10.24874/jsscm.2019.13.02.04>
23. Chas-Amil M. L., Touza J., García-Martínez E. Forest fires in the wildland–urban interface: a spatial analysis of forest fragmentation and human impacts. *Applied Geography*. 2013. Vol. 43. Pp. 127–137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.06.010>
24. de Paula D. J., Rodrigues J. P. C., Camargo A. L., Experimental tests on fire behaviour of roof covering systems. *Fire Safety Journal*. 2026. 104650. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2026.104650>
25. Sharma A., Mishra K. B. Thermal hazards and fire risk evaluation of transformer oil-heat transfer dynamics and safety implications. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2025. Vol. 65. 103814. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2025.103814>

26. Planas E., Paugam R., Àgueda A., Vacca P. & Pastor E., Fires at the wildland-industrial interface. Is there an emerging problem? *Fire Safety Journal*. 2023. Vol. 141. 103906. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103906>

27. Modugno S., Balzter H., Cole B., Borrelli P., Mapping regional patterns of large forest fires in Wildland–Urban Interface areas in Europe. *Journal of Environmental Management*. 2016. Vol. 172. Pp. 112–126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.02.013>

28. Fernández-Manso A., Quintano C., Fernández-Guisuraga J. M., Roberts D., Next-gen regional fire risk mapping: Integrating hyperspectral imagery and National Forest Inventory data to identify hot-spot wildland-urban interfaces. *Science of the total environment*. 2024. Vol. 940. 173568. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173568>

29. Price O., Ondeï S., Bowman D. M., Progress and prospects for predicting wildfire spread through the Wildland-urban interface. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2025. Vol.121. 105392. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2025.105392>

REFERENCES

1. Zakon Ukrainy. (2001). *Pro obiekty pidvyshchenoi nebezpeky* [Law of Ukraine: On high-risk objects]. *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy*, (15), 73. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2245-14#Text> [in Ukrainian].

2. Kabinet Ministriv Ukrainy. (2022, May 20). *Pro zatverdzhennia Poriadku orhanizatsii okhorony i zakhystu lisiv* [On approval of the procedure for organizing forest protection and defense] (No. 612). Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/612-2022-%D0%BF#top> [in Ukrainian].

3. Ministerstvo nadzvychainykh sytuatsii Ukrainy. (2011, August 25). *Pro zatverdzhennia Metodychnykh rekomendatsii shchodo znyzhennia nebezpeky vplyvu lisovykh pozhezh na arsenaly, bazy i sklady boieprypasiv, shcho roztashovani v lisovykh masyvakh* [On approval of methodological recommendations for reducing the impact of forest fires on arsenals, bases and ammunition depots located in forest areas] (No. 890). Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0890735-11#top> [in Ukrainian].

4. Derzhavnyi komitet lisovoho hospodarstva Ukrainy. (2004, December 27). *Pro zatverdzhennia Pravyi pozhezhnoi bezpeky v lisakh Ukrainy* [On approval of fire safety rules in the forests of Ukraine] (No. 278). Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0328-05#Text> [in Ukrainian].

5. Derzhavnyi komitet lisovoho hospodarstva Ukrainy. (2005, December 28). *Pro zatverdzhennia Polozhennia pro lisovi pozhezhni stantsii* [On approval of the regulation on forest fire stations] (No. 526). Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0047-06#Text> [in Ukrainian].

6. Kuzyk, A. D. (2019). *Ekoloho-lisivnychi osnovy pozhezhnoi bezpeky lisiv Maloho Polissia* [Ecological and silvicultural foundations of fire safety in the forests of Male Polissya]. Lviv: Spolom. [in Ukrainian].

7. Singh, H., Ang, L. M., Lewis, T., Paudyal, D., Acuna, M., Srivastava, P. K., & Srivastava, S. K. (2024). Trending and emerging prospects of physics-based and ML-based wildfire spread models: A comprehensive review. *Journal of Forestry Research*, 35(1), 135. <https://doi.org/10.1007/s11676-024-01783-x>

8. Ning, J., Liu, H., Yu, W., Deng, J., Sun, L., Yang, G., & Yu, H. (2024). Comparison of different models to simulate forest fire spread: A case study. *Forests*, 15(3), 563. <https://doi.org/10.3390/f15030563>

9. Kucheriavyi, V. P. (2008). *Sady i parky Lvova* [Gardens and parks of Lviv]. Lviv: Svit. [in Ukrainian].

10. Erni, S., Johnston, L., Boulanger, Y., Manka, F., Bernier, P., Eddy, B.,... & Gauthier, S. (2021). Exposure of the Canadian wildland–human interface and population to wildland fire, under current and future climate conditions. *Canadian Journal of Forest Research*, 51(9), 1357–1367. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0422>

11. Quiroz, N. F., Gibson, L., Conradie, W. S., Ryan, P., Heydenrych, R., Moran, A.,... & Walls, R. (2023). Analysis of the 2017 Knysna fires disaster with emphasis on fire spread, home losses and the influence of vegetation and weather conditions: A South African case study. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 88, 103618. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2023.103618>

12. Filkov, A. I., Tihay-Felicelli, V., Masoudvaziri, N., Rush, D., Valencia, A., Wang, Y.,... & Tam, W. C. (2023). A review of thermal exposure and fire spread mechanisms in large outdoor fires and the built environment. *Fire safety journal*, 140, 103871. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103871>

13. Morvan D. (2011). Physical phenomena and length scales governing the behaviour of wildfires: a case for physical modelling. *Fire technology*, 47, 437-460. <https://doi.org/10.1007/s10694-010-0160-2>

14. Mell, W., McNamara, D., Maranghides, A., McDermott, R., Forney, G., Hoffman, C., & Ginder M. (2011). Computer modelling of wildland-urban interface fires. *Fire & Materials*, San Francisco, CA, 31 Jan – 2 Feb P.12.

15. Jiang, W., Wang, F., Fang, L., Zheng, X., Qiao, X., Li, Z., & Meng, Q. (2021). Modelling of wildland-urban interface fire spread with the heterogeneous cellular automata model. *Environmental Modelling & Software*, 135, 104895. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104895>

16. Starodub Yu. P., Ursulyak P. P. (2011). Development of stages of projects of impact of forest fires on objects of increased danger on the example of Ivano-Frankivsk region. *Bulletin of Lviv State University of Life Safety*, 5, 32–38. Retrieved from: https://ldubgd.edu.ua/sites/default/files/files/5_2.pdf [in Ukrainian].

17. Manzello, S.L., & Hofmann, A. (2025). Editorial on Special Issue on Wildland–Urban Interface (WUI) Fires. *Fire and Materials*, 49, 509–511. <https://doi.org/10.1002/fam.3308>
18. Arruda, M. R. T., Bicelli, A. R. A. & Branco, F. (2024). Ignition locations and simplified design guidelines for enhancing the resilience of dwellings against wildland fires. *Fire*, 7(2), 40. <https://doi.org/10.3390/fire7020040>
19. Ricci, F., Scarponi, G. E., Pastor, E., Planas, E., & Cozzani, V. (2021). Safety distances for storage tanks to prevent fire damage in Wildland-Industrial Interface. *Process Safety and Environmental Protection*, 147, 693–702. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.01.002>
20. Scarponi, G. E., Landucci, G., Heymes, F., & Cozzani, V. (2018). Experimental and numerical study of the behavior of LPG tanks exposed to wildland fires. *Process Safety and Environmental Protection*, 114, 251–270. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.12.013>
21. Ricci, F., Misuri, A., Scarponi, G. E., Cozzani, V., & Demichela, M. (2024). Vulnerability assessment of industrial sites to interface fires and wildfires. *Reliability Engineering & System Safety*, 243, 109895. <https://doi.org/10.1016/j.res.2023.109895>
22. Tatsiy, R. M., Pazen, O. Yu., Vovk, S. Ya., Ropyak, L. Ya., & Pryhorovska, T. O. (2019). Numerical study on heat transfer in multilayered structures of main geometric forms made of different materials. *Journal of the Serbian society for computational mechanics*, 13(2), 36–55. <https://doi.org/10.24874/jssc.2019.13.02.04>
23. Chas-Amil, M. L., Touza, J., & García-Martínez, E. (2013). Forest fires in the wildland–urban interface: a spatial analysis of forest fragmentation and human impacts. *Applied Geography*, 43, 127–137. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.06.010>
24. de Paula, D. J., Rodrigues, J. P. C., & Camargo, A. L. (2026). Experimental tests on fire behaviour of roof covering systems. *Fire Safety Journal*, 104650. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2026.104650>
25. Sharma, A., & Mishra, K. B. (2025). Thermal hazards and fire risk evaluation of transformer oil-heat transfer dynamics and safety implications. *Thermal Science and Engineering Progress*, 65, 103814. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2025.103814>
26. Planas, E., Paugam, R., Àgueda, A., Vacca, P., & Pastor, E. (2023). Fires at the wildland-industrial interface. Is there an emerging problem? *Fire Safety Journal*, 141, 103906. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103906>
27. Modugno, S., Balzter, H., Cole, B., & Borrelli, P. (2016). Mapping regional patterns of large forest fires in Wildland–Urban Interface areas in Europe. *Journal of Environmental Management*, 172, 112–126. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.02.013>
28. Fernández-Manso, A., Quintano, C., Fernández-Guisuraga, J. M., & Roberts, D. (2024). Next-gen regional fire risk mapping: Integrating hyperspectral imagery and National Forest Inventory data to identify hot-spot wildland-urban interfaces. *Science of the total environment*, 940, 173568. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173568>
29. Price, O., Ondei, S., Bowman, D. M. (2025). Progress and prospects for predicting wildfire spread through the Wildland-urban interface. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 121, 105392. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2025.105392>

© А. Д. Кузик, Д. Р. Лозова

Оглядова стаття

Дата першого надходження статті до видання: 02.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 29.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.48.2026.08>

О. В. Лазаренко

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

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

✉ lazarenkoalexandr@gmail.com

АНАЛІЗ ПРОДУКТІВ ТЕРМІЧНОГО РОЗКЛАДУ ЯК СПОСІБ РАНЬОГО ВИЯВЛЕННЯ ЗАГОРАННЯ ЛІТІЙ-ІОННИХ АКУМУЛЯТОРІВ ЖИВЛЕННЯ

Вступ. Різноманітні пожежні сповіщувачі та давачі залежно від своїх характеристик виявляють осередки горіння на ранніх стадіях загорань, що призводить до спрацювання систем пожежогасіння та/або виклику оперативного-рятувальних підрозділів. Однак, такий шлях виявлення горіння може бути запізнитим та неефективним в разі горіння літій-іонних елементів живлення (ЛІЕЖ) та акумуляторних батарей великої потужності на їх основі.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є аналіз продуктів термічного розкладу, що утворюються внаслідок виникнення незворотної термохімічної реакції у внутрішньому наповненні ЛІЕЖ з подальшим визначенням ключових параметрів, які можуть слугувати індикаторами початку виникнення незворотної термохімічної реакції в ЛІЕЖ. Для досягнення поставленої мети в роботі було: здійснено аналіз сучасного стану науково-обґрунтованих результатів експериментальних досліджень щодо визначення продуктів термічного розкладу ЛІЕЖ; встановлено ключові показники та параметри типові для всіх ЛІЕЖ під час перебігу реакції термічного розкладу; визначено та обґрунтовано параметри та показники за якими можливо встановити початок горіння ЛІЕЖ.

Методи. Для вирішення поставлених задач дослідження необхідно здійснити аналітичне опрацювання сучасних результатів наукових досліджень (теоретичних та експериментальних) щодо визначення та встановлення хімічного складу та параметрів, що супроводжують термічний розклад внутрішнього наповнення ЛІЕЖ під час виникнення незворотної термохімічної реакції.

Результати. Встановлено, що основними показниками, що визначають початок виникнення термічного розкладу внутрішнього наповнення ЛІЕЖ є безпосереднє зростання абсолютного тиску в об'ємі розташування ЛІЕЖ внаслідок термічного розкладу твердого електроліту, аноду та катоду елемента. В подальшому зростає концентрація вуглекислого та чадного газу за рахунок інтенсивного розкладу та згорання інших продуктів термічного розкладу. В окремих випадках, зокрема при термічному розкладі ЛІЕЖ NCR 18650В, також може виділятися HF.

Висновки. На першопочаткових стадіях термічного розкладу елемента (90–120 °С) йде інтенсивне виділення C_2H_4 , CO_2 , CO , HF , DMS , EMC . Після зростання температурних показників вище (в межах 180–300 °С), відбувається інтенсивний термічний розклад DMS , EMC на такі сполуки як CH_3OCH_3 , C_2H_5OH , C_2H_6 , C_2H_4 ; основними показниками попереднього виявлення термічного розкладу ЛІЕЖ можна вважати зростання тиску в замкнутому об'ємі зберігання (використання) елементів, підвищення концентрації CO_2 , CO .

Ключові слова: продукти термічного розкладу, літій-іонний елемент живлення, ЛІЕЖ, реакція термічного розкладу, горіння ЛІЕЖ.

ANALYSIS OF THERMAL DECOMPOSITION PRODUCTS AS A METHOD FOR EARLY DETECTION OF LITHIUM-ION BATTERIES FIRE

Introduction. Various fire detectors and sensors, depending on their characteristics, detect combustion centers in the early stages of fire development, which leads to the activation of fire extinguishing systems and/or the call of emergency services. However, this way of preventing the spread of combustion may be delayed and ineffective in the case of burning lithium-ion batteries (LIB) and high-capacity rechargeable batteries based on them.

The purpose and objectives of the study. The aim of the work is to analyze the thermal decomposition products formed as a result of the occurrence of an irreversible thermochemical reaction in the internal filling of the LIB with the subsequent determination of key parameters, indicators that can serve as indicators of the onset of an irreversible thermochemical reaction in the LIB. To achieve the set goal, the work: analyzed the current state of scientifically substantiated results of experimental studies on the determination of thermal decomposition products of the LIB; established key indicators and parameters typical for all LIB during the course of the thermal decomposition reaction; determined and substantiated the parameters and indicators by which it is possible to establish the onset of combustion of the LIB.

Methods. To solve the research tasks, it is necessary to carry out an analytical study of modern results of scientific research (theoretical and experimental) on the determination and establishment of the chemical composition and parameters that accompany the thermal decomposition of the internal filling of the LIB during the occurrence of an irreversible thermochemical reaction.

Results. It has been established that the main indicators that determine the onset of thermal decomposition of the internal filling of the LIB are the direct increase in absolute pressure in the volume of the LIB location as a result of thermal decomposition of the solid electrolyte, anode and cathode of the element. Subsequently, the concentration of carbon dioxide and carbon monoxide increases due to intensive decomposition and combustion of other products of thermal decomposition. A separate indicator of the course of thermal decomposition of LIB is also the presence of a compound such as HF, in particular during the thermal decomposition of LIB NCR 18650B.

Conclusions. At the initial stages of thermal decomposition of the element (90–120 °C) there is an intensive release of C_2H_4 , CO_2 , CO , HF , DMC , EMC . After the temperature increases above (within 180–300 °C), there is an intensive thermal decomposition of DMC , EMC into such compounds as CH_3OCH_3 , C_2H_5OH , C_2H_6 , C_2H_4 and the rest of the combustible gases of the group; The main indicators of preliminary detection of thermal decomposition of LIB can be considered an increase in pressure in the closed volume of storage (use) of elements, an increase in the concentration of CO_2 , CO .

Key words: thermal decomposition products, lithium-ion battery, LIB, thermal decomposition reaction, LIB combustion.

Вступ. Статистика випадків загорань та пожеж кожного року змінюється, на жаль, досить часто загальна кількість пожеж зростає в тій чи іншій галузі промисловості чи інфраструктурних об'єктів. Одним з шляхів зменшення кількості випадків пожеж є системна робота відповідних служб та органів в напрямку превентивної діяльності. Проведення різноманітних інформаційно-роз'яснювальних заходів, тренінгів та загалом навчання населення правилам та вимогам пожежної безпеки спрямовані саме на зниження кількості пожеж в цілому на об'єктах різної форми власності. Додатковим заходом виявлення виникнення загорань та як наслідок розвитку пожежі є системи пожежної сигналізації та контролю, які на ранніх стадіях горіння дозволяють локалізувати та унеможливити перебіг горіння в цілому, що призводить до мінімальних матеріальних втрат та зберігає людські життя. Пожежні сповісвачі

залежно від своїх характеристик виявляють осередки горіння на ранніх стадіях горіння, що призводить до спрацювання систем пожежогасіння та/або виклику оперативного-рятувальних підрозділів. Відповідно до типу пожежного сповісвача вони можуть спрацьовувати на інтенсивне виділення продуктів горіння (диму), наявність інфрачервоного випромінювання або високої температури (теплові, інфрачервоні). Відповідно, такий засіб виявлення термічного розкладу внутрішнього наповнення літій-іонних елементів живлення (ЛІЕЖ) та акумуляторних батарей (АБ) великої потужності на їх основі може бути запізним та не ефективним.

Постановка проблеми. Низка наукових досліджень та практичні випадки горіння ЛІЕЖ засвідчують, що природа їхнього горіння та подальшого розвитку пожежі може бути як надзвичайно стрімкою – з появою інтенсивного полум'я та високими

температурними показниками (900–1000 °С) [1, 2], так і відбуватися повільно з виділенням значної кількості продуктів термічного розкладу внутрішнього наповнення ЛПЕЖ без відкритого горіння [3]. Застосування в таких умовах типових пожежних сповіщувачів (димових, теплових, комбінованих, тощо) не призведе до швидкого виявлення загорань ЛПЕЖ чи АБ, а тим більше не здійснить оповіщення про виникнення загорання.

Враховуючи особливості будови та різноманіття ЛПЕЖ (циліндричні, призматичні, пакетні) та їх хімічного наповнення (LCO – літій-кобальт-оксид, NCA – літій-нікель-кобальт-алюміній-оксид, NCM – літій-нікель-манган-кобальт-оксид, LMO – літій-манган-оксид) [4] під час початку виникнення реакції термічного розкладу може відбуватися виділення різноманітних за своїм хімічним складом, хімічних речовин. Залежно від хімічного наповнення ЛПЕЖ продукти термічного розкладу будуть відрізнятися один від одного. Якісний склад продуктів термічного розкладу також залежить від того, в яких саме компонентах ЛПЕЖ протікає термічний розклад: в твердому електроліті, катоді чи аноді, а також від ступеня заряду елемента (SOC).

Зазначені факти та результати попередніх наукових досліджень дають підстави вважати, що під час горіння ЛПЕЖ мають бути розроблені спеціалізовані засоби раннього виявлення початку їх термічного розкладу та/або займання.

Постановка мети та завдань дослідження. Метою роботи є аналіз продуктів термічного розкладу, що утворюються внаслідок виникнення незворотної термохімічної реакції у внутрішньому наповненні ЛПЕЖ з подальшим визначенням ключових параметрів, показників які можуть слугувати індикаторами початку виникнення незворотної термохімічної реакції в ЛПЕЖ.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

– здійснити аналіз сучасного стану науково-обґрунтованих результатів експериментальних досліджень щодо визначення продуктів термічного розкладу внутрішнього наповнення ЛПЕЖ;

– встановити ключові показники та параметри типові для всіх ЛПЕЖ під час перебігу реакції термічного розкладу;

– визначити та обґрунтувати параметри та показники за якими можливо встановити початок термічного розкладу ЛПЕЖ.

Методи досліджень. Для вирішення поставлених задач дослідження необхідно здійснити аналітичне опрацювання сучасних результатів наукових досліджень (теоретичних та експериментальних) щодо визначення та встановлення хімічного складу та параметрів, що супроводжують

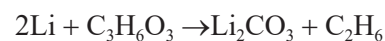
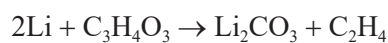
термічний розклад внутрішнього наповнення ЛПЕЖ під час виникнення незворотної термохімічної реакції.

Виклад основного матеріалу. Досить ранні дослідження особливостей термічного розкладу внутрішнього наповнення ЛПЕЖ показують, що незалежно від виду хімічного складу аноду та катоду, першопочатково в наслідок зростання внутрішньої температури елемента та термічного розкладу твердого електроліту в середині елемента [5, 6] за температури 90–120 °С утворюються наступні речовини:



Відповідно хімічної реакції відбувається інтенсивне виділення вуглекислого газу та не значна частка кисню, що також пояснює ефект повторного займання елементів та складності їх гасіння традиційними методами.

Подальший перебіг термічного розкладу супроводжується порушенням контакту розділу поверхонь твердого електроліту з анодом елемента, що призводить до виділення горючих газів групи СН [7]. Продукти термічного розкладу твердого електроліту утворюють такі сполуки як диметилкарбонат ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$, далі – DMC), пропіленкарбонат ($\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_3$, далі – PC), етиленкарбонат ($\text{C}_3\text{H}_4\text{O}_3$, далі – EC):

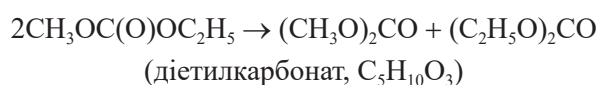


Подальше зростання температури ЛПЕЖ призводить до безпосередньої взаємодії катода і анода (внаслідок повної деструкції розділяючого прошарку при температурі 135–166 °С), що спричиняє коротке замикання, інтенсивне газо- й тепло-виділення та подальше горіння.

Подальший хімічний склад продуктів термічного розкладу буде вже залежати від типу катода, що використовується в ЛПЕЖ. Як правило, внаслідок розкладу будуть утворюватися оксиди металів, такі як Co_3O_4 для LCO [8], $\text{Li}_x\text{CO}_y\text{Al}_z\text{O}_p$ для NCA, $(\text{Mn}, \text{Ni})\text{O}$ та $\text{Li}_x(\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})\text{O}_2$ для NCM [9] та інші.

Висвітлені результати досліджень можна вважати основоположними та такими, що визначили подальші задачі дослідження для всіх видів ЛПЕЖ. Пізніші дослідження дають можливість отримати більш повний опис хімічного складу продуктів термічного розкладу внутрішнього наповнення ЛПЕЖ з визначенням їх відсоткового співвідношення та додаткових параметрів, що впливають на їх концентрацію, об'єм, тощо.

Зокрема, значна кількість публікацій [10–12] присвячена детальному дослідженню термічного розкладу та згорання зокрема таких речовин як DMC, PC, EC. Так, у дослідженні [10] зазначено, що внаслідок підвищення температури в межах 280–300 °C відбувається стрімкий розклад DMC, в результаті чого, окрім уже наявних речовин, а саме карбон(II) оксиду (CO), карбон(IV) оксиду (CO₂), утворюються метанол (CH₃OH), метан (CH₄), диметиловий етер (CH₃OCH₃), ацетатна кислота (CH₃COOH). Додатково в дослідженні [11, 12] представлено детальний опис термічного розкладу вихідних сполук DMC та EMC (етилметилкарбонат, C₄H₈O₃) за температури 180–300 °C. Першочергово визначено, що DMC утворюється внаслідок розкладу EMC під час реакції:



Проведенні дослідження показали наявність відповідних речовин (табл. 1).

Висвітлені результати є безсумнівно актуальними, однак при розгляді питання можливості раннього виявлення термічного розкладу внутрішнього наповнення ЛПЕЖ слід враховувати, що зазначені речовини є продуктами високотемпературного розкладу, який відбувається вже після розвитку горіння ЛПЕЖ.

За результатами дослідження [12] встановлено, що на склад і концентрацію продуктів термічного розкладу та подальшого горіння ЛПЕЖ, окрім уже зазначених чинників, впливають також способи їх нагрівання та ініціювання термохімічної реакції (нагрівання, механічне пошкодження, надмірна дія струму тощо). Точність отриманих результатів залежить від обраного методу визначення продуктів термічного розкладу і подальшого горіння, а також від точності використовуваної апаратури (зокрема, хроматографів, засобів спектрального аналізу тощо).

Додатково, в роботі [13] наведені результати експериментальних досліджень щодо визначення продуктів термічного розкладу за початкової стадії термічного розкладу різних видів ЛПЕЖ, а саме: NMC (анод нікель-манган-кобальт), циліндричного формату 18650 – CH₄ (125–157 °C); LFP (анод літій-ферум-фосфат), циліндричного формату 26650 – DMC, EMC, C₂H₄, CO₂, CO, (80 °C); NCA, 18650 – CO₂, C₂H₂, (116–139 °C).

Варто зазначити, що в роботі [14] наведені результати щодо визначення першопочаткових продуктів термічного розкладу та особливо їхньої кількості для ЛПЕЖ пакетного формату. Цікавим є той факт, що в продуктах термічного розкладу виявлена незначна частка такої речовини як HF (гідроген флуорид). Також наведено розподіл

Таблиця 1

Хімічні речовини, які утворюються під час термічного розкладу внутрішнього наповнення ЛПЕЖ відповідно до дослідження [12]

Продукти термічного розкладу	Температура термічного розкладу, °C					
	180		240		300	
	DMC	EMC	DMC	EMC	DMC	EMC
CH ₃ OC(=O)H	+	–	+	–	+	–
H ₂	+	+	+	+	+	+
CH ₃ OCH ₃	+	+	+	+	+	+
CO ₂	+	+	+	+	+	+
CO	–	–	+	+	+	+
CH ₃ OH	+	+	+	+	+	+
CH ₄	–	–	+	–	+	+
CH ₃ C(=O)OCH ₃	–	–	–	–	–	+
C ₂ H ₄	–	–	–	+	–	+
CH ₃ C(=O)H	–	+	–	+	–	+
C ₂ H ₅ OC ₂ H ₅	–	–	–	–	–	+
CH ₃ OC ₂ H ₅	–	+	–	+	–	+
C ₂ H ₅ OH	–	+	–	+	–	+
C ₂ H ₆	–	–	–	–	–	+
C ₃ H ₆	–	–	–	–	–	+
DMC	–	+	–	+	–	+
EMC	–	+	–	+	–	+

Примітка: «–» – відповідний продукт термічного розкладу не виділяється, «+» – відповідний продукт термічного розкладу виділяється.

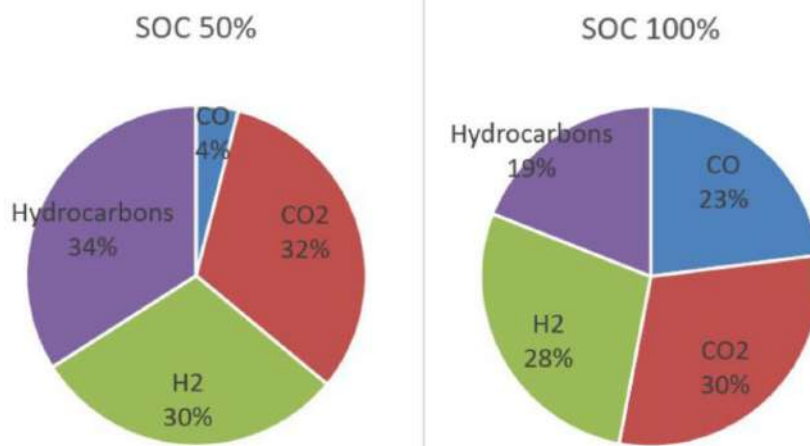


Рис. 1. Відсотковий склад продуктів термічного розкладу ЛПЕЖ відповідно до [14, 15] залежно від ступеня заряду (SOC)

основних продуктів термічного розкладу залежно від ступеня заряду елемента (SOC) ЛПЕЖ (рис. 1).

Окрім того слід зауважити, що за результатами досліджень [15] також встановлено величину зростання тиску в середині камери згорання внаслідок термічного розкладу ЛПЕЖ, відповідно величина зміни тиску становила практично 50 % першопочаткового і склала 103 421 Па для ЛПЕЖ потужністю 7.7 Вт/год.

В переважній більшості, подальший аналіз наукових результатів досліджень [16-19] підтверджує наявність відповідних речовин відмінності стосуються, лише концентрації та об'єму продуктів термічного розкладу.

Однак дослідження [16] можна виокремити, оскільки в роботі наведені досить цікаві та інформативні результати з точки зору розподілу концентрації продуктів термічного розкладу саме залежно від температурних показників циліндричної ЛПЕЖ, особливо на ранніх стадіях початку термохімічної реакції. Окрім того, висвітлена залежність зміни тиску враховуючи інтенсивне виділення продуктів згорання. Використовуючи отримані результати [16], можна окремо зобразити наступні залежності рис. 2.

Отримані результати показують та вчергове підтверджують можливість виділення HF. Разом з тим концентрація всіх зазначених речовин інтенсивно збільшується впродовж процесу термічного розкладу наповнення ЛПЕЖ до моменту виникнення повноцінного горіння. Загальний час проведення експериментального дослідження, зокрема нагрівання ЛПЕЖ з інтенсивністю 5 °C/хв становив 4500 с. Максимальна температура нагрівання ЛПЕЖ становила 550 °C, що відповідає часу нагрівання 3150 с. Початок виявлення продуктів термічного розкладу ЛПЕЖ припадає на 1600 с, що відповідає температурі близько 90 °C.

Як зазначають автори роботи [16], DMC схильний до подальшого розкладу, тому її концентрація є не стабільною і змінюється в сторону зменшення впродовж всього процесу термічного розкладу та безпосереднього подальшого горіння ЛПЕЖ. Результати представлені на рис. 2. важливі з точки зору подальшого визначення залежності зміни концентрації відповідних речовин під час протікання термохімічної реакції в ЛПЕЖ.

Загалом приведені дані щодо зміни концентрації DMC, відповідно корелюються з результатами попередніх досліджень [7-12]. Аналогічно кількісні показники наявності основних речовин, включно з HF, приведені в роботах [17-18].

Цікавим та вартим уваги показником під час термічного розкладу ЛПЕЖ є визначення та встановлення залежності об'єму продуктів термічного розкладу та величини зростання тиску у відповідному об'ємі. Якщо розглядати порядок виявлення та встановлення продуктів термічного розкладу ЛПЕЖ, то це є процес, який, в першу чергу, вимагає зростання гранично допустимих показників концентрації відповідної речовини та особливо часу зростання і фіксації цієї концентрації речовини. Однак, такий параметр як зростання тиску відбувається набагато швидше і його передача в просторі відбувається за іншими принципами.

Щодо визначення зростання показників тиску під час виникнення незворотньої термохімічної реакції в середині ЛПЕЖ можна також виокремити результати наведені в роботі [19]. В роботі встановлено, що об'єм продуктів термічного розкладу ЛПЕЖ може обраховуватися з розрахунку 0,94 л/Вт·год (для аноду типу LTO – літій-титаноксид). Для порівняння в роботі [15] показники об'єму продуктів термічного розкладу на Вт енергії ЛПЕЖ становить в межах 0,2÷0,4 л/Вт·год. Відповідно, за таких умов загальний тиск під

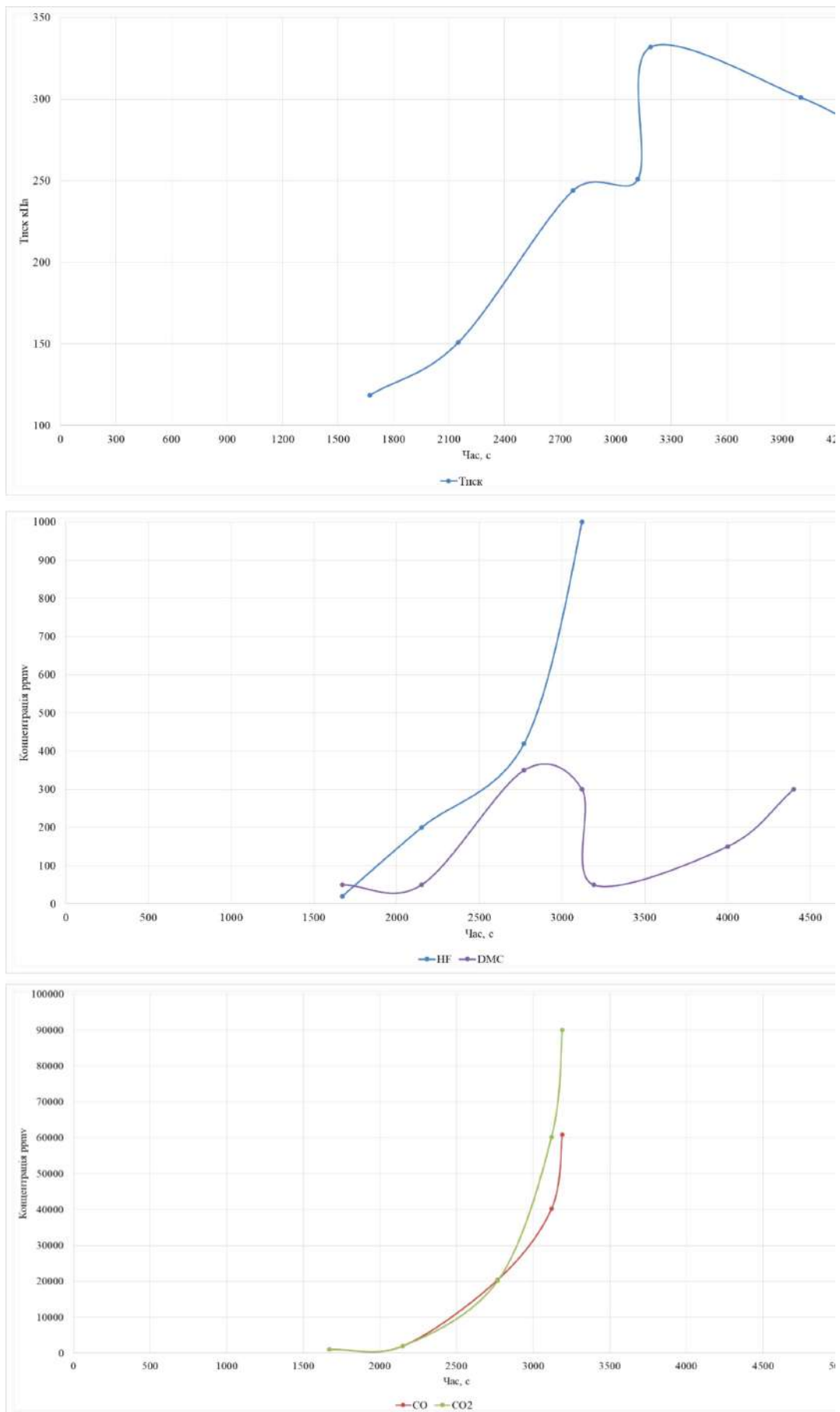


Рис. 2. Графік зміни концентрації продуктів термічного розкладу та тиску залежно від часу зростання температурних показників ЛПЕЖ (5 °С/хв) [16]

час перебігу термічного розкладу ЛПЕЖ формату 18 650 (NMC) може досягти до 232 бар, як це зазначено в роботі [19].

Питання актуальних методів та засобів раннього виявлення процесу термічного розкладу внутрішнього наповнення ЛПЕЖ в різноманітних акумуляторних системах накопичення електроенергії присвячена значна кількість наукових досліджень. Узагальнюючим доробком останніх років можуть слугувати роботи [20, 21]. Так, в дослідженні [20] висвітлено основні сучасні підходи щодо можливості визначення початку незворотної термохімічної реакції, зокрема встановлено, що перспективними та надійними методами можуть бути акустичний, газоаналітичний, електротехнічний (зміна параметрів споживання елемента) та оптичний. Разом з тим, в роботі [21] наведені результати напрацювань щодо можливості виявлення початку термохімічної реакції в ЛПЕЖ використовуючи саме параметри зміни тиску середовища одночасно зі змінами електротехнічних показників елемента.

В роботі [22] представлено метод ультразвукового визначення критичних параметрів ЛПЕЖ з метою моніторингу початку безпосереднього термічного розкладу ЛПЕЖ. Дослідження [23] приводить результати розробки безпровідного датчика моніторингу температурних показників ЛПЕЖ формату 21700. Як додатковий показник виявлення початку незворотної термохімічної реакції в ЛПЕЖ в дослідженні [24] наведено залежність зміни спектру електрохімічного опору ЛПЕЖ залежно від температури елемента.

Окремим напрямком дослідження з виявлення початку виникнення термічного розкладу в ЛПЕЖ можна вважати напрямок розробки алгоритмів та матриць оцінки ризику виходу елемента з ладу [24, 25].

Отримані результати попередніх наукових досліджень та їх подальший аналіз дозволяє зробити висновок, що основними показниками, що супроводжують протікання незворотної термохімічної реакції та подальше займання ЛПЕЖ, є безпосереднє зростання тиску в об'ємі розташування ЛПЕЖ внаслідок термічного розкладу твердого електроліту, аноду та катоду елемента. В подальшому зростає концентрація вуглекислого та чадного газу за рахунок інтенсивного розкладу та згорання продуктів, які виділяються. Суперечливими та такими, що потребують подальшого дослідження і обґрунтування є результати експериментального визначення [16] наявності під час термічного розкладу ЛПЕЖ таких речовин як HF та CH_4 . Врахування відповідних показників може бути підґрунтям для подальшої розробки та

визначення показників спрацювання мультидатчика щодо раннього виявлення термічного розкладу ЛПЕЖ та подальшого його горіння.

Висновок. Відповідно до мети дослідження та проведеного огляду сучасного стану реалізації наукових досягнень щодо визначення хімічного складу продуктів термічного розкладу внутрішнього наповнення ЛПЕЖ, можна зробити наступні висновки:

– об'єм та хімічний склад продуктів термічного розкладу внутрішнього наповнення ЛПЕЖ залежить від ступеня заряду елемента, причини виникнення незворотної термохімічної реакції, внутрішнього наповнення елемента та стадії протікання незворотної термохімічної реакції всередині ЛПЕЖ;

– на першопочаткових стадіях термічного розкладу елемента (90–120 °C) в переважній більшості інтенсивно виділяються C_2H_4 , CO_2 , CO, HF, DMC, EMC. Після зростання температурних показників в межах 180–300 °C, відбувається інтенсивний термічний розклад DMC, EMC на CH_3OCH_3 , $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, C_2H_6 , C_2H_4 , що в свою чергу призводить до зростання концентрації вуглекислого та чадного газу;

– утворення HF можливе за умови термічного розкладу ЛПЕЖ NCR 18650B.

Відповідно, під час термічного розкладу внутрішнього наповнення ЛПЕЖ відбувається постійне виділення продуктів термічного розкладу, що призводить до зростання абсолютного тиску ($P_{\text{абс}}$) у відповідній системі зберігання ЛПЕЖ. Зміна параметра $P_{\text{абс}}$ є одним з ключових показників виявлення термічного розкладу ЛПЕЖ.

Таким чином, подальші дослідження повинні бути зосереджені на визначенні та встановленні залежності зростання концентрації CO_2 , HF та $P_{\text{абс}}$ під час термічного розкладу ЛПЕЖ, що повинно скласти наукове підґрунтя для розробки принципів (алгоритмів) спрацювання та подальшої розробки відповідних давачів або систем раннього виявлення термічного розкладу внутрішнього наповнення ЛПЕЖ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Experimental evaluation of the influence of excessive electric current on the fire hazard of lithium-ion powercell / O. Lazarenko, T. Berezhanskyi, V. Pospolitat, Pazen. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. Vol. 4, № 10 (118). P. 67–75. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263001>
2. Prediction of heat release rate of single/double 32,650 lithium ion batteries / W. An et al. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2023. Vol. 148, № 5. P. 2057–2067. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11766-x>

3. McKinnon M., DeCrane S., Kerber S. Four firefighters injured in lithium-ion battery energy storage system explosion – Arizona. UL Firefighter Safety Research Institute, 2020. 66 p. DOI: <https://doi.org/10.54206/102376/TEHS4612>
4. Який хімічний склад найкраще підходить для електрифікації вашого автомобіля? Давайте відкриємо для себе різні типи акумуляторів : [сайт]. URL: <https://www.flashbattery.tech/en/blog/types-of-lithium-batteries-which-chemistry-use/> (дата звернення: 22.04.2024).
5. TG-MS analysis of solid electrolyte interphase (SEI) on graphite negative-electrode in lithium-ion batteries / L. Zhao et al. *Journal of Power Sources*. 2006. Vol. 161, № 2. P. 1275–1280. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.05.045>
6. Investigations of the exothermic reactions of natural graphite anode for li-ion batteries during thermal runaway / H. Yang et al. *Journal of the Electrochemical Society*. 2004. Vol. 152, № 1. P. A73. DOI: <https://doi.org/10.1149/1.1836126>
7. Gas chromatography/mass spectrometry as a suitable tool for the liion battery electrolyte degradation mechanisms study / G. Gachot et al. *Analytical chemistry*. 2011. Vol. 83, № 2. P. 478–485. DOI: <https://doi.org/10.1021/ac101948u>
8. Thermal reactions between delithiated lithium nickelate and electrolyte solutions / H. Arai et al. *Journal of The Electrochemical Society*. 2002. Vol. 149, № 4. P. A401. DOI: <https://doi.org/10.1149/1.1452114>
9. Characterization of behaviour and hazards of fire and deflagration for high-energy li-ion cells by over-heating / P. Ping et al. *Journal of Power Sources*. 2018. Vol. 398. P. 55–66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.07.044>
10. Bugryniec P. J., Vernuccio S., Brown S. F. Towards a micro-kinetic model of Li-ion battery thermal runaway – Reaction network analysis of dimethyl carbonate thermal decomposition. *Journal of Power Sources*. 2023. Vol. 580. Art. 233394. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233394>
11. An experimental and kinetic modeling study on dimethyl carbonate (DMC) pyrolysis and combustion / W. Sun et al. *Combustion and Flame*. 2016. Vol. 164. P. 224–238. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2015.11.019>
12. Fernandes Y., Bry A., de Persis S. Thermal degradation analyses of carbonate solvents used in Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*. 2019. Vol. 414. P. 250–261. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.12.077>
13. Nilsson E. J. K., Ahlberg Tidblad A. Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries: A Review of Experimental Results and Methodologies. *Batteries*. 2024. Vol. 10. Art. 443. DOI: <https://doi.org/10.3390/batteries10120443>
14. Darnikowsk D. Development of Thermal Runaway Emissions Aftertreatment System (TREAS) of Lithium Ion Batteries. *Transactions of the Institute of Fluid-Flow Machinery*. 2023. № 142. P. 47–59. DOI: <https://doi.org/10.58139/v2q1-r455>
15. Somandepalli V., Marr K., Horn Q. Quantification of combustion hazards of thermal runaway failures in lithium-ion batteries. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*. 2014. Vol. 3, № 1. P. 98–104. DOI: <https://doi.org/10.4271/2014-01-1857>
16. Identification of Key Events and Emissions during Thermal Abuse Testing on NCA 18650 Cells / S. Ubaldi et al. *Energies*. 2023. Vol. 16. Art. 3250. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16073250>
17. Review of gas emissions from lithium-ion battery thermal runaway failure – Considering toxic and flammable compounds / P. J. Bugryniec et al. *Journal of Energy Storage*. 2024. Vol. 87. Art. 111288. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111288>
18. A review of nail penetration and thermal abuse tests of lithium-ion batteries and their emission characterization / A. S. Nair et al. *Batteries*. 2026. Vol. 12, № 2. Art. 74. DOI: <https://doi.org/10.3390/batteries12020074>
19. Ali M. M. E. H., Ghodrat M. Thermal and combustion characteristics of vent gases from lithiumion battery thermal runaway: a comprehensive review. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2025. Vol. 150. P. 13925–13952. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-025-14616-8>
20. Advances in early warning of thermal runaway in lithium-ion battery energy storage systems / D. Han et al. *Adv. Sensor Res.* 2025. Vol. 4. Art. 2400165. DOI: <https://doi.org/10.1002/adsr.202400165>
21. Early warning method and fire extinguishing technology of lithium-ion battery thermal runaway: a review / K. Wang et al. *Energies*. 2023. Vol. 16. Art. 2960. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16072960>
22. Ultrasonic Health Monitoring of Lithium-Ion Batteries / Y. Wu et al. *Electronics*. 2019. Vol. 8, № 7. Art. 751. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics8070751>
23. Internal field study of 21700 battery based on longlife embedded wireless temperature sensor / L. Yang et al. *Acta Mechanica Sinica*. 2021. Vol. 37, № 6. P. 895–901. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10409-021-01103-0>
24. Reliable and early warning of lithium-ion battery thermal runaway based on electrochemical impedance spectrum / P. Dong et al. *Journal of the Electrochemical Society*. 2021. Vol. 168. Art. 090529. DOI: <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac239b>
25. The Multi-Parameter Fusion Early Warning Method for Lithium Battery Thermal Runaway Based on Cloud Model and Dempster–Shafer Evidence Theory / Z. Xie et al. *Batteries*. 2024. Vol. 10, № 9. Art. 325. DOI: <https://doi.org/10.3390/batteries10090325>
26. Miao H. Research on accurate fire detection & early warning model for lithium-ion battery packs. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2024. Vol. 2703. Art. 012068. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2703/1/012068>

REFERENCES

1. Lazarenko, O., Berezhanskyi, T., Pospolitak, V., & Pazen. (2022). Experimental evaluation of the influence of excessive electric current on the fire hazard of lithium-ion power cell. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(10(118)), 67–75. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263001>
2. An, W., Lu, Y., Liu, F., Wang, T., Xu, W., & Wang, Z. (2023). Prediction of heat release rate of single/double 32,650 lithium-ion batteries. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148(5), 2057–2067. <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11766-x>
3. McKinnon, M., DeCrane, S., & Kerber, S. (2020). Four firefighters injured in lithium-ion battery energy storage system explosion – Arizona. UL Firefighter Safety Research Institute. <https://doi.org/10.54206/102376/TEHS4612>
4. Flash Battery. (n.d.). Which chemistry is most suitable for the electrification of your vehicle? Let's discover the different types of batteries. <https://www.flashbattery.tech/en/blog/types-of-lithium-batteries-which-chemistry-use/>
5. Zhao, L., Watanabe, I., Doi, T., Okada, S., & Yamaki, J. I. (2006). TG-MS analysis of solid electrolyte interphase (SEI) on graphite negative-electrode in lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 161(2), 1275–1280. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.05.045>
6. Yang, H., Bang, H., Amine, K., & Prakash, J. (2004). Investigations of the exothermic reactions of natural graphite anode for Li-ion batteries during thermal runaway. *Journal of The Electrochemical Society*, 152(1), A73. <https://doi.org/10.1149/1.1836126>
7. Gachot, G., Ribiere, P., Mathiron, D., Grugeon, S., Armand, M., Leriche, J.-B., Pilard, S., & Laruelle, S. (2011). Gas chromatography/mass spectrometry as a suitable tool for the Li-ion battery electrolyte degradation mechanisms study. *Analytical Chemistry*, 83(2), 478–485. <https://doi.org/10.1021/ac101948u>
8. Arai, H., Tsuda, M., Saito, K., Hayashi, M., & Sakurai, Y. (2002). Thermal reactions between delithiated lithium nickelate and electrolyte solutions. *Journal of The Electrochemical Society*, 149(4), A401. <https://doi.org/10.1149/1.1452114>
9. Ping, P., Kong, D., Zhang, J., Wen, R., & Wen, J. (2018). Characterization of behaviour and hazards of fire and deflagration for high-energy Li-ion cells by over-heating. *Journal of Power Sources*, 398, 55–66. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.07.044>
10. Bugryniec, P. J., Vernuccio, S., & Brown, S. F. (2023). Towards a micro-kinetic model of Li-ion battery thermal runaway – Reaction network analysis of dimethyl carbonate thermal decomposition. *Journal of Power Sources*, 580, 233394. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233394>
11. Sun, W., Yang, B., Hansen, N., Westbrook, C. K., Zhang, F., Wang, G., Moshhammer, K., & Law, C. K. (2016). Experimental and kinetic modeling study on dimethyl carbonate (DMC) pyrolysis and combustion. *Combustion and Flame*, 164, 224–238. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2015.11.019>
12. Fernandes, Y., Bry, A., & de Persis, S. (2019). Thermal degradation analyses of carbonate solvents used in Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 414, 250–261. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.12.077>
13. Nilsson, E. J. K., & Ahlberg Tidblad, A. (2024). Gas emissions from lithium-ion batteries: A review of experimental results and methodologies. *Batteries*, 10, 443. <https://doi.org/10.3390/batteries10120443>
14. Darnikowsk, D. (2023). Development of Thermal Runaway Emissions Aftertreatment System (TREAS) of lithium-ion batteries. *Transactions of the Institute of Fluid-Flow Machinery*, 142, 47–59. <https://doi.org/10.58139/v2q1-r455>
15. Somandepalli, V., Marr, K., & Horn, Q. (2014). Quantification of combustion hazards of thermal runaway failures in lithium-ion batteries. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, 3(1), 98–104. <https://doi.org/10.4271/2014-01-1857>
16. Ubaldi, S., Conti, M., Marra, F., & Russo, P. (2023). Identification of key events and emissions during thermal abuse testing on NCA 18650 cells. *Energies*, 16, 3250. <https://doi.org/10.3390/en16073250>
17. Bugryniec, P. J., Resendiz, E. G., Nwophoke, S. M., Khanna, S., James, C., & Brown, S. F. (2024). Review of gas emissions from lithium-ion battery thermal runaway failure – Considering toxic and flammable compounds. *Journal of Energy Storage*, 87, 111288. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111288>
18. Shibu Nair, A., Wu, X.-Y., Das, P. K., & Fowler, M. (2026). A review of nail penetration and thermal abuse tests of lithium-ion batteries and their emission characterization. *Batteries*, 12(2), 74. <https://doi.org/10.3390/batteries12020074>
19. Ali, M. M. E. H., & Ghodrat, M. (2025). Thermal and combustion characteristics of vent gases from lithium-ion battery thermal runaway: A comprehensive review. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 150, 13925–13952. <https://doi.org/10.1007/s10973-025-14616-8>
20. Han, D., Wang, J., Yin, C., & Zhao, Y. (2025). Advances in early warning of thermal runaway in lithium-ion battery energy storage systems. *Advanced Sensor Research*, 4, 2400165. <https://doi.org/10.1002/adsr.202400165>
21. Wang, K., Ouyang, D., Qian, X., Yuan, S., Chang, C., Zhang, J., & Liu, Y. (2023). Early warning method and fire extinguishing technology of lithium-ion battery thermal runaway: A review. *Energies*, 16, 2960. <https://doi.org/10.3390/en16072960>
22. Wu, Y., Wang, Y., Yung, W. K. C., & Pecht, M. (2019). Ultrasonic health monitoring of lithium-ion batteries. *Electronics*, 8(7), 751. <https://doi.org/10.3390/electronics8070751>
23. Yang, L., Li, N., Hu, L., Wang, S., Wang, L., Zhou, J., Song, W.-L., Sun, L., Pan, T.-S., Chen, H.-S., & Fang, D. (2021). Internal field study of 21700 battery based on long-life embedded wireless temperature sensor. *Acta Mechanica Sinica*, 37(6), 895–901. <https://doi.org/10.1007/s10409-021-01103-0>

24. Dong, P., Liu, Z., Wu, P., Li, Z., Wang, Z., & Zhang, J. (2021). Reliable and early warning of lithium-ion battery thermal runaway based on electrochemical impedance spectrum. *Journal of The Electrochemical Society*, 168, 090529. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac239b>

25. Xie, Z., Zhang, Y., Wang, H., Li, P., Shi, J., Zhang, X., & Li, S. (2024). The multi-parameter fusion

early warning method for lithium battery thermal runaway based on cloud model and Dempster–Shafer evidence theory. *Batteries*, 10(9), 325. <https://doi.org/10.3390/batteries10090325>

26. Miao, H. (2024). Research on accurate fire detection & early warning model for lithium-ion battery packs. *Journal of Physics: Conference Series*, 2703, 012068. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2703/1/012068>

© О. В. Лазаренко

Оглядова стаття

Дата першого надходження статті до видання: 02.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 29.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.48.2026.09>

*В. І. Луш, Я. Б. Великий, Р. М. Конанець, А. С. Лин, Р. В. Пархоменко,
Ю. Т. Судніцин, Я. І. Федюк, Ю. І. Панчишин, М. А. Кривуненко*
*Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
м. Львів, Україна*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5931-3181> – В. І. Луш
<https://orcid.org/0009-0002-3241-5211> – Я. Б. Великий
<https://orcid.org/0000-0003-2360-4002> – Р. М. Конанець
<https://orcid.org/0000-0002-4012-4556> – А. С. Лин
<https://orcid.org/0009-0008-2954-6767> – Р. В. Пархоменко
<https://orcid.org/0009-0002-4218-8446> – Ю. Т. Судніцин
<https://orcid.org/0009-0004-3469-073X> – Я. І. Федюк
<https://orcid.org/0000-0001-8056-2326> – Ю. І. Панчишин
<https://orcid.org/0009-0008-9061-9179> – М. А. Кривуненко



luschlviv@ukr.net

АНАЛІЗ ЗАСОБІВ ТА СПОСОБІВ ЗАБОРУ ВОДИ ПОЖЕЖНИМИ АВТОЦИСТЕРНАМИ З ВІДКРИТИХ ВОДОДЖЕРЕЛ ТА ЇХ УДОСКОНАЛЕННЯ

Проблема. У статті розглянуто актуальну проблему, щодо забезпечення пожежно-рятувальних підрозділів вогнегасним засобом (водою) для ведення оперативних дій під час гасіння пожеж та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій різного характеру. Вода, як основний найпоширеніший та найдоступніший вогнегасний засіб пожежно-рятувальними підрозділами ДСНС України забирається з водомереж: пожежних гідрантів чи пожежних водоймищ. В умовах правового режиму воєнного стану в Україні, особливо у прифронтових областях, де ворог активно знищує об'єкти критичної інфраструктури, виникає гостре питання щодо забезпечення вогнегасними речовинами пожежно-рятувальні підрозділи для гасіння пожеж та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій. Саме тому, питання забору води пожежними автоцистернами з альтернативних джерел водопостачання залишається одним із важливих напрямків сфери пожежної безпеки.

Мета. Проведення аналізу існуючих способів і засобів забору води з відкритих водоймищ, визначення найбільш ефективних, а також удосконалити забір води із відкритих вододжерел із рівнем води, що перевищує висоту всмоктування пожежних насосів до пожежних автомобілів при застосуванні всмоктувального пожежного рукави та всмоктувальної пожежної сітки.

Новизна роботи полягає у систематизації сучасних підходів до способів і засобів забору води з відкритих водоймищ та використання існуючих підтримуючих пристроїв (водяних буїв) для удосконалення забору води із відкритих вододжерел із рівнем води, що перевищує висоту всмоктування пожежних насосів.

Методи дослідження. У роботі проведено ґрунтовний аналіз вітчизняних і зарубіжних досліджень, присвячених способам і засобам забору води з відкритих водоймищ для наповнення пожежних автоцистерн, щоб забезпечити потрібну витрату води на пожежогасіння об'єктів. Проведено математичні розрахунки, щодо доцільності удосконалення способів та засобів забору води.

Основні результати дослідження. Досліджено роботи вітчизняних та закордонних вчених у сфері забезпечення водопостачання під час гасіння пожеж та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, проаналізовано ефективність традиційних схем забору води (з використанням всмоктувальних рукавів і сіток, гідроелеваторів, плаваючих мотопомп) та встановлено переваги способу з всмоктувальними рукавами діаметром 125–150 мм (продуктивність 40–65 л/с). Досліджено види підтримуючих пристроїв (водяних буїв) та їх технічні характеристики. Запропоновано використовувати водяні буї як підтримуючий пристрій, що кріпиться до всмоктувальної сітки за допомогою металевого ланцюга з карабіном. Проведено математичний розрахунок щодо доцільності використання даних підтримуючих пристроїв

(водяних буїв) та буде складати 81 % занурення підтримуючого пристрою (буя), що є допустимим враховуючи вагу пожежно-технічного обладнання.

Висновки. Відповідно до проведеного аналізу та математичного розрахунку дане дослідження має практичне значення для подальшого розроблення/удосконалення підтримуючих пристроїв для забору води із відкритих вододжерел до пожежних автомобілів. Також для підвищення ефективності застосування всмоктувальних пожежних рукавів та всмоктувальної пожежної сітки необхідним буде врахування умов забору води (замуленість дна, наявність очерету, швидкість руху течії тощо). Для підтвердження ефективності теоретично обґрунтованого впливу підтримуючого пристрою (буя) на глибину занурення всмоктувального пожежного рукава та всмоктувальної пожежної сітки доцільним є проведення експериментальних досліджень. Запропонований підтримуючий пристрій буде мати практичне значення та може бути використаний пожежно-рятувальними підрозділами під час гасіння пожеж та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій спричинених ворожими обстрілами.

Ключові слова: відкриті вододжерела, альтернативні джерела водопостачання, забір води, підтримуючий пристрій, всмоктувальна пожежна сітка, всмоктувальний пожежний рукав, підготовка пожежного-рятувальника.

*V. I. Lushch, Ya. B. Velykyi, R. M. Konanets, A. S. Lun, R. V. Parkhomenko,
Yu. T. Sudnitsyn, Ya. I. Fedyuk, Yu. I. Panchyshyn, M. A. Kryvunenko
Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine*

ANALYSIS OF MEANS AND METHODS OF WATER INTAKE BY FIRE TANKERS FROM OPEN WATER SOURCES AND THEIR IMPROVEMENT

Introduction. The article addresses a relevant issue concerning the provision of fire-rescue units with the fire-extinguishing agent (water) required for operational activities during firefighting and emergency response. Water, as the primary, most widespread, and most accessible extinguishing agent, is supplied to fire-rescue units of the State Emergency Service of Ukraine from water supply networks, namely fire hydrants or fire reservoirs. Under the legal regime of martial law in Ukraine, particularly in frontline regions where the enemy actively destroys critical infrastructure facilities, an acute problem arises regarding the provision of fire-rescue units with extinguishing agents necessary for firefighting and emergency response operations. Therefore, water intake by fire tankers from alternative water sources remains an important area within the field of fire safety.

Purpose. To analyze existing methods and means of water intake from open water bodies, identify the most effective approaches, and improve water intake from open water sources with a water level exceeding the suction lift height of fire pumps installed on fire vehicles when using suction fire hoses and suction fire net.

The novelty of the study lies in the systematisation of modern approaches to methods and means of water intake from open water bodies and in the use of existing supporting devices (water buoys) to improve water intake from open water sources with water levels exceeding the permissible suction height of fire pumps.

Methods. The work presents a comprehensive analysis of domestic and international research devoted to methods and means of water intake from open water bodies for filling fire tankers in order to ensure the required water flow rate for firefighting operations. Mathematical calculations were carried out to substantiate the feasibility of improving water intake methods and equipment.

Results. Analyzing the works of domestic and foreign researchers in the field of water supply provision during firefighting and emergency response operations were examined. The effectiveness of traditional water intake schemes (using suction hoses and strainers, hydraulic ejectors, and floating motor pumps) was analyzed, and the advantages of the method employing suction hoses with a diameter of 125–150 mm (capacity of 40–65 L/s) were identified. Types of supporting devices (water buoys) and their technical characteristics were studied. It is proposed to use water buoys as a supporting device attached to the suction strainer by means of a metal chain with a carabiner. A mathematical calculation confirmed the feasibility of using such supporting devices, indicating an immersion level of the supporting device (buoy) of 81 %, which is acceptable considering the weight of firefighting equipment.

Conclusion. According to the conducted analysis and mathematical calculations, the study has practical significance for further development and improvement of supporting devices intended for water intake from open water sources to fire vehicles. In addition, improving the efficiency of suction fire hoses and suction strainers requires consideration of water intake conditions (bottom siltation, presence of reeds, flow velocity, etc.). To confirm the effectiveness of the theoretically substantiated influence of the supporting device (buoy) on the immersion depth of the suction fire hose and suction strainer, experimental studies are advisable. The proposed supporting device has practical applicability and may be used by fire-rescue units during firefighting operations and emergency response activities caused by hostile shelling.

Key words: open water sources, alternative water sources, water intake, supporting device, suction fire net, suction fire hose, firefighter training

Постановка проблеми. Аналізуючи статистику виникнення пожеж, проблема підвищення рівня пожежної безпеки в Україні залишається надзвичайно актуальною. За 2025 рік в державі зареєстровано 99 298 пожеж. Порівняно з 2024 роком кількість пожеж зменшилася на 5,6 %, що відбулося, насамперед, за рахунок зменшення кількості пожеж на відкритих територіях (–9,1 %) та у будинках та спорудах житлового призначення (–9,0 %), питома вага яких разом становить 86,0 % від їх загальної кількості. Унаслідок пожеж загинуло 1 725 людей, у тому числі загинуло 52 дитини; 2 129 людей отримали травми, у тому числі травмовано 158 дітей. Матеріальні втрати від пожеж склали 59 млрд 722 млн 171 тис. грн (із них прями збитки становлять 52 млрд 665 млн 237 тис. грн; побічні – 7 млрд 056 млн 934 тис. грн) [1].

В умовах правового режиму воєнного стану в Україні, особливо у прифронтових областях, де агресор активно знищує об'єкти критичної інфраструктури (теплові електростанції, електричні підстанції, насосні станції водопостачання), що унеможливує забезпечення зазначених об'єктів електро-, тепло- та водопостачанням, постає гостра проблема забезпечення ефективного реагування пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС України. Знищення елементів критичної інфраструктури безпосередньо призводить до оперативних обмежень для підрозділів ДСНС України, а саме відсутністю необхідного тиску у водопровідних мережах та неможливості забезпечення потрібної витрати води на гасіння пожеж [2–4].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідження у сфері засобів та способів забору води відображено у низці вітчизняних та закордонних досліджень. Багато авторів [5–7] звертають увагу на проблематику забезпеченості водопостачання, а не удосконалення засобів та методів забору води пожежно-рятувальними підрозділами.

Розглядаючи українських дослідників, слід звернути увагу на створення корисної моделі насосно-рукавної всмоктувальної системи з підтримуючим пристроєм. Дана модель складається зі всмоктувального рукава, всмоктувальної сітки, підтримуючого пристрою, який виконаний з поліетилену прямокутної порожнистої форми та має фіксуючий жолоб кріплення для всмоктувального рукава та сітки [5]. Однак можна побачити ряд недоліків, таких як велика габаритність, важкість у встановленні у обмежених місцях.

Закордонні дослідники Sowby R. B. та Porter B. W. на основі аналізу пожеж на Мауї 2023 р. підкреслюють критичну роль відкритих вододжерел (озера, струмки) при падінні тиску

в мережах на 40–60 % через пошкодження інфраструктури [6].

Крім того Pierce Manufacturing та інші закордонні виробники у рекомендаціях щодо гасіння пожеж у сільській місцевості, з незадовільним водозабезпеченням, наголошують на важливості використанні всмоктувальних рукавів з плаваючими сітками для подолання обмежень висоти всмоктування та підвищення продуктивності. Автори зазначають, що стандартні всмоктувальні лінії без додаткової стабілізації часто призводять до втрат продуктивності через повітряні пробки та занурення на дно [7].

У дослідженні [8] наголошено, що пожежні насоси мають вирішальне значення для потреб пожежогасіння, але вони піддаються ефекту кавітації, що негативно впливає на їх продуктивність. Автори встановили залежність числа кавітації від витрати води та запропонували удосконалити конструкцію насоса для експлуатаційної стабільності. У роботах [9; 10] досліджено динаміку нестационарного потоку у вертикальному пожежному насосі та вплив моделей турбулентності на механізм потоку та характеристики роботи насоса. Даний підхід може бути використаний для дослідження швидкостей потоку води при заборі з відкритих річок. Проте у роботах не враховано використання для забору води всмоктувального пожежного рукава та всмоктувальної пожежної сітки.

На основі проведеного аналізу встановлено необхідність проведення досліджень методів забору води пожежними автомобілями з використанням пожежних насосів та дослідженні способів забору води з відкритих водоймищ, для забезпечення потрібної витрати води на пожежогасіння об'єктів.

Мета статті – провести аналіз та теоретично дослідити вплив підтримуючого пристрою (буя) на глибину занурення всмоктувального пожежного рукава та всмоктувальної пожежної сітки під час забору води з відкритих вододжерел.

Постановка задачі та її розв'язання: проведення аналізу існуючих способів та засобів забору води з відкритих водоймищ для наповнення пожежних автоцистерн; визначення їх ефективності та недоліків, а також розроблення теоретичного підґрунтя для створення нового пристрою, з більш ефективними характеристиками забору води із відкритих вододжерел із рівнем води, що перевищує висоту всмоктування пожежних насосів до пожежних автомобілів при застосуванні всмоктувального пожежного рукава та всмоктувальної пожежної сітки.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих

результатів. Під час виникнення надзвичайних подій та ситуацій у мирний та воєнний час в Україні для гасіння пожеж та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій різного характеру основним вогнегасним засобом є вода. Для забезпечення успішної локалізації та ліквідації надзвичайної події необхідно виконання однієї з основних умов локалізації, а саме фактична витрата води перевищує розрахунково необхідну витрату води на пожежогасіння [4, 11]:

$$Q_{\phi} > Q_{\text{нотр}}, \quad (1)$$

де, Q_{ϕ} – фактична витрата води (л/с); $Q_{\text{нотр}}$ – потрібна витрата води на пожежогасіння (л/с).

Потрібна витрата води на пожежогасіння об'єктів, забезпечується від водомереж (пожежних гідрантів) чи пожежних водоймищ. Розроблено та досліджено велику кількість варіантів забору води для наповнення пожежних цистерн [2–5]. Однак, на рисунку 1 продемонстровано найефективніші та найбільш практиковані схеми оперативних розгортань пожежно-рятувальних відділень на пожежній автоцистерні (далі – АЦ) при заборі води для наповнення цистерни.

При активних ворожих атаках російської федерації відбувається знищення або пошкодження об'єктів критичної інфраструктури (теплові електростанції, електричні підстанції, насосні станції тощо), що призводить до порушення електропостачання, теплопостачання та водопостачання та знижує ефективність реагування пожежно-рятувальних підрозділів. Також, в таких випадках, досягти необхідного тиску води та водовіддачі від водонапірної мережі для успішної локалізації пожежі вкрай важко, а деколи неможливо. Відповідно, пожежно-рятувальні підрозділи в більшості випадків для забезпечення себе вогнегасними речовинами для гасіння пожеж використовують пожежні водоймища та альтернативні джерела водопостачання, такі як природні і технічні (озера, річки, градирні тощо).

Для забору води із відкритих вододжерел до пожежних автомобілів використовують наступне пожежно-технічне обладнання (далі – ПТО): всмоктувальні пожежні рукави та всмоктувальну пожежну сітку (рис. 2) [12].

У випадку, якщо рівень води перевищує висоту всмоктування пожежних насосів або

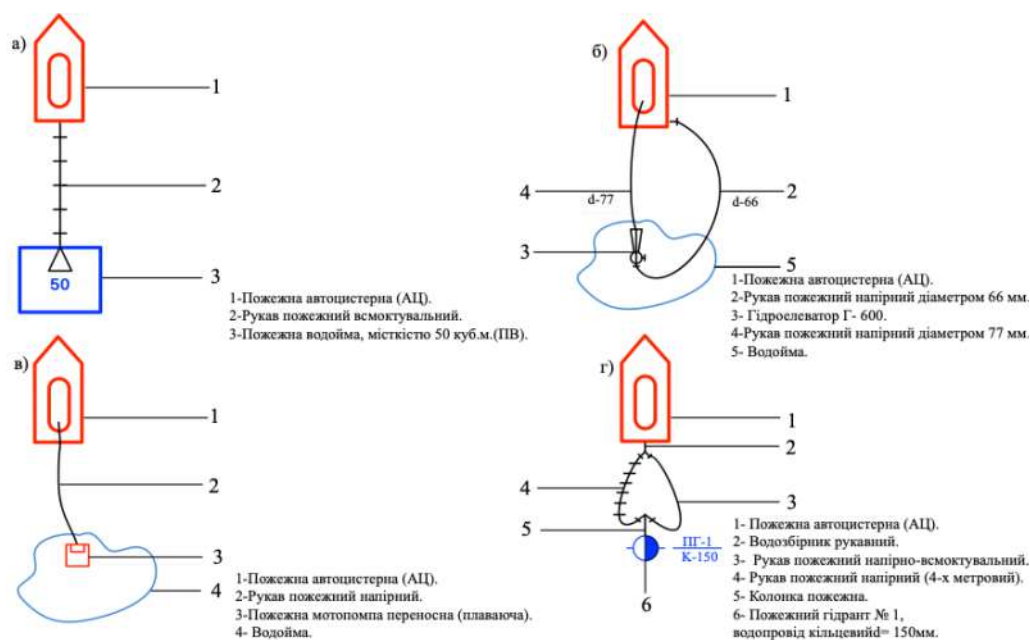


Рис. 1. Схеми оперативних розгортань відділення на пожежній автоцистерні при заборі води для наповнення цистерни: а) при заборі води від пожежного водоймища; б) при заборі води за допомогою гідроелеватора; в) при заборі води за допомогою плаваючої пожежної мотопомпи; г) при заборі води від пожежного гідранта



Рис. 2. Натурні взірці: а) всмоктувальна пожежна сітка; б) всмоктувальний пожежний рукав



Рис. 3. Натурні взірці: а) гідроелеватор Г-600; б) плаваюча пожежна мотопомпа



Рис. 4. Блок-схема забору води із відкритих вододжерела пожежною автоцистерною

береги відкритих вододжерел заболочені, що не дає змогу пожежним автоцистернам успішно забрати воду, використовують наступне ПТО: пожежний гідроелеватор Г-600 з напірними рукавами, або плаваючі пожежні мотопомпи з напірними рукавами (рис. 3). Однак, забезпеченість пожежно-рятувальних підрозділів даним обладнанням залежить від тактико-технічних характеристик пожежних автомобілів, які іноді не передбачаються заводами-виробниками при комплектації. Крім того 100 % пожежних цистерн передбачає комплектацію всмоктувальними пожежними рукавами та всмоктувальною

пожежною сіткою, що стає перевагою перед додатковим обладнанням (гідроелеваторами та пожежними мотопомпами).

Отже, пожежно-рятувальними відділеннями застосовується безліч різноманітного ПТО та варіантів забору води з відкритих вододжерел, але необхідно структурувати дані варіації, розробивши блок-схему (рис. 4).

Для успішного забору води необхідно також розуміти тактико-технічні характеристики ПТО. В таблиці 1 наведено тактико-технічні характеристики обладнання для забору води з відкритого вододжерела, а саме продуктивність та вагу.

Таблиця 1

Тактико-технічні характеристики приладів для забору води [12]

№ з/п	Найменування приладу	Продуктивність, л/с	Вага, кг
1	Всмоктувальна сітка(СВ-125)	40	3,8
2	Всмоктувальна сітка(СВ-150)	65	4,0
3	Гідроелеватор (Г-600)	10	7,5
4	Плаваюча мотопомпа (Aquafast 3,5 HP-A)	10	21
5	Напірний рукав ($d = 38$)	5,7	7
6	Напірний рукав ($d = 51$)	10,2	9
7	Напірний рукав ($d = 66$)	17,1	11
8	Напірний рукав ($d = 77$)	23,3	13
9	Напірний рукав ($d = 89$)	40	15
10	Напірний рукав ($d = 110$)	65	24
11	Напірний рукав ($d = 150$)	100	35
12	Всмоктуючий рукав ($d = 100$)	30	9,0
13	Всмоктуючий рукав ($d = 125$)	60	12,6
14	Всмоктуючий рукав ($d = 150$)	100	16
15	Напірно-всмоктуючий ($d = 75$)	15	6,2

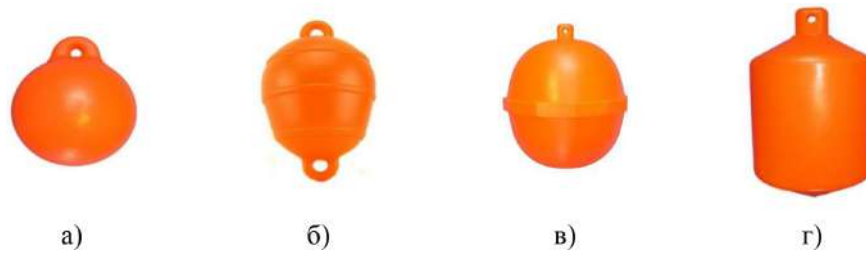


Рис. 5. Натурні взірці сигнальних буїв: а) буй сигнальний БС-7; б) сигнальний буй пляжний; в) буй сигнальний БС-12; г) буй Веха В1

При використанні пожежних мотопомп пожежно-рятувальними підрозділами для забору води з відкритих вододжерел їх продуктивність становить орієнтовно 6–35 л/с [13–15], а враховуючи дані таблиці 1, видно, що спосіб забезпечення АЦ водою з відкритого вододжерела за допомогою всмоктуючого рукава та всмоктувальної пожежної сітки є більш ефективним. Продуктивність даного обладнання в залежності від діаметру рукава буде становити в межах 40–65 л/с.

Слід врахувати що загальна вага одного всмоктуючого рукава та всмоктувальної пожежної сітки в залежності від діаметру буде складати певну вагу, а саме:

- при діаметрі всмоктувального рукава 125 мм: $12,6 + 3,8 = 16,4$ кг;
- при діаметрі всмоктувального рукава 150 мм: $16 + 4 = 20$ кг.

При умові застосування двох всмоктуючих рукавів та всмоктувальної пожежної сітки вага буде збільшуватись, а саме:

- при діаметрі всмоктувального рукава 125 мм: $2 \times 12,6 + 3,8 = 29$ кг;
- при діаметрі всмоктувального рукава 150 мм – $2 \times 16 + 4 = 36$ кг.

Відповідно пропонується удосконалити забір води із відкритих вододжерел із рівнем води, що перевищує висоту всмоктування пожежних насосів (з верхнього шару водоймища з глибини 0,3–0,4 м і більше) до пожежних автомобілів при застосуванні всмоктувального пожежного рукава (двох рукавів) та всмоктувальну пожежної сітки діаметром 125–150 мм враховуючи їхню вагу, про що зазначалось вище. Для цього необхідно, щоб всмоктувальна сітка знаходилась під дзеркалом водойми на глибині що відповідає 0,3–0,4 м. Цю умову можна забезпечити за допомогою: підтримуючого пристрою який кріпиться до всмоктувальної сітки за допомогою металевого ланцюга та карабіна.

В якості підтримуючого пристрою можна використовувати сигнальні буї (рис. 5). Буї виготовляються з поліетилену, стійкого до ультрафіолету та перепадів температур від -60 до $+60$ °С. Поліетилен, що застосовується, не розтріскується при

ударах. Буї використовуються для позначення зон купання, місць проведення робіт на водній акваторії. Можливе заповнення їх пінополіуретаном для підтримання більшої плавучості [16].

Крім того, слід враховувати їх технічні характеристики, які наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Технічні характеристики сигнальних буїв [16]

Тип сигнальних буїв	Діаметр, мм	Вага, кг	Об'єм, л
Буй сигнальний БС-7	230	0,4	7
Сигнальний буй пляжний	250	0,5	12
Буй сигнальний БС-12	290	0,6	12
Буй Веха В1	600–1000	20	100

Отже, розглянувши призначення та технічні характеристики сигнальних буїв, можна допустити можливість їх застосування в якості підтримуючого пристрою для забору води АЦ із відкритих вододжерел при застосуванні всмоктувального пожежного рукава та всмоктувальної пожежної сітки. Для цього можливо розглядати два сигнальні буї, це сигнальний буй пляжний та буй сигнальний БС-12, які мають схожі технічні характеристики, невеликі за габаритами та вагою, що дозволяє їх вивозити на пожежній автоцистерні як у пожежному відсіку біля всмоктувальної пожежної сітки так і безпосередньо на даху поруч з пеналом для зберігання всмоктувального пожежного рукава.

Для підтвердження доцільності використання даних сигнальних буїв, можливо провести прості фізичні розрахунки, котрі базуються на законі Архімеда [17]. Розрахунки слід проводити за найобтяжливіших умов, використання двох всмоктувальних пожежних рукавів та всмоктувальної пожежної сітки з загальною масою 36 кг та використання сигнального пляжного буя.

Спершу слід визначити максимальну вантажопідйомність одного сигнального буя:

$$P_{\text{буй}} = (V_{\text{буй}} \times \rho_{\text{вод}}) - m_{\text{буй}}, \quad (2)$$

де, $P_{\text{буй}}$ – підйомна сила буя, кг; $V_{\text{буй}}$ – об'єм буя, м³; $\rho_{\text{вод}}$ – густина води, кг/м³; $m_{\text{буй}}$ – маса буя, кг.

$$P_{\text{буй}} = (0,012 \times 1000) - 0,5 = 11,5 \text{ кг.}$$

З даної формули випливає, що один з запропонованих буйів може максимально витримати на поверхні прісної води 11,5 кг вантажу.

Наступним чинником, який слід розрахувати є вага обладнання у воді:

$$P_{\text{облад}} = m_{\text{облад}} \times \left(1 - \frac{\rho_{\text{вод}}}{\rho_{\text{облад}}}\right), \quad (3)$$

де, $P_{\text{облад}}$ – вага обладнання у воді, кг; $m_{\text{облад}}$ – маса обладнання, кг; $\rho_{\text{вод}}$ – густина води, кг/м³; $\rho_{\text{облад}}$ – середня густина матеріалу, кг/м³ (для ПТО доцільно приймати 1350 кг/м³);

$$P_{\text{облад}} = 36 \times \left(1 - \frac{1000}{1350}\right) \approx 9,33 \text{ кг.}$$

Таким чином, вага обладнання у воді (два всмоктуючі пожежних рукава та всмоктуючі сітка) теоретично складає 9,33 кг.

Порівнявши значення обладнання та бую можна зрозуміти, що підйомна сила одного бую у прісній воді перевищує вагу обладнання у воді.

$$11,5 \text{ кг} > 9,33 \text{ кг}$$

Крім того, провівши простий розрахунок, можна визначити відсоток занурення бую під час використання:

$$K_{\text{зан}} = \frac{P_{\text{облад}}}{P_{\text{буй}}} \times 100 \% ; \quad (4)$$

$$K_{\text{зан}} = \frac{9,33}{11,5} \times 100 \% \approx 81 \%.$$

Дані розрахунки підтверджують практичність застосування сигнальних буйів (на прикладі сигнального пляжного бую) під час забору води з відкритих вододжерел за допомогою всмоктувальних пожежних рукавів та всмоктувальної пожежної сітки.

Окрім розрахункового підтвердження, для практичного застосування сигнального бую у якості підтримуючого пристрою для забору води АЦ із відкритих вододжерел при застосуванні всмоктувального пожежного рукави та всмоктувальну пожежної сітки, необхідно вирішити задачу, щодо кріплення його до всмоктувальної пожежної сітки. Для цього необхідно дообладнати кріпленням сигнальний буй, а саме металічним ланцюгом та карабіном, як показано на рисунку 6.

Слід також внести доповнення до таблицю оперативного розрахунку особового складу, а саме при встановленні АЦ на відкрите вододжерело номери оперативного розрахунку: водій та пожежний № 4 додатково під'єднують сигнальний буй до всмоктувальної пожежної сітки та опускають на дзеркало водойми. При цьому всмоктувальна пожежна сітка буде повністю занурена на глибині що відповідає 0,3–0,4 м, та буде забезпечувати продуктивність пожежного насосу в межах 40–65 л/с в першу чергу для цілей пожежога-сіння. [4]

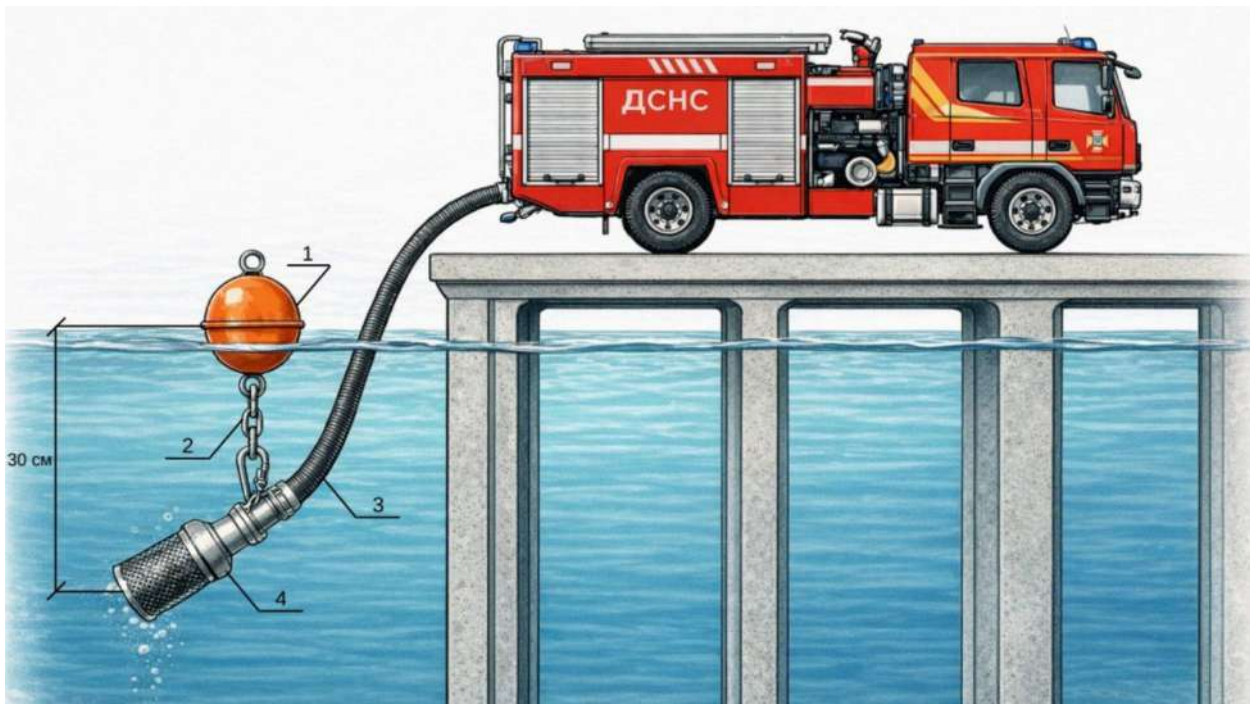


Рис. 6. Приклад забору води пожежною автоцистерною при застосуванні підтримуючого пристрою:
1) сигнальний буй; 2) металічний ланцюг з карабіном; 3) всмоктувальний пожежний рукав;
4) всмоктувальна пожежна сітка

Висновок. Провівши аналіз публікацій щодо засобів та способів забору води пожежними автомобілями обґрунтовано необхідність удосконалення даних способів для забезпечення потреб пожежогасіння пожежно-рятувальних підрозділів.

На підставі виконаних досліджень теоретично обґрунтовано вплив запропонованого підтримуючого пристрою (буя) на глибину занурення всмоктувальної пожежної сітки під час забору води з відкритих вододжерел з врахуванням висоти всмоктування пожежних насосів. Встановлено, що під час використання забору води з використанням двох всмоктуючих пожежних рукавів та всмоктуючої сітки занурення буя буде складати 81 %, що є допустимим враховуючи вагу пожежно-технічного обладнання.

Перспективами подальших досліджень є розроблення/удосконалення підтримуючих пристроїв для забору води із відкритих вододжерел до пожежних автомобілів. Також для підвищення ефективності застосування всмоктувальних пожежних рукавів та всмоктувальної пожежної сітки необхідним буде врахування умов забору води (замуленість дна, наявність очерету, швидкість руху течії тощо). Для підтвердження ефективності теоретично обґрунтованого впливу підтримуючого пристрою (буя) на глибину занурення всмоктувальної пожежної сітки доцільним є проведення експериментальних досліджень.

Запропонований підтримуючий пристрій буде мати практичне значення та може бути використаний пожежно-рятувальними підрозділами під час гасіння пожеж та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій спричинених ворожими обстрілами.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Аналітична довідка про пожежі та їх наслідки в Україні за 12 місяців 2025 року. *Державна служба України з надзвичайних ситуацій*. URL: <https://dsns.gov.ua/upload/2/5/5/1/7/8/2/analitichna-dovidka-pro-pozezi-2025.pdf>

2. Дії підрозділів ДСНС України в умовах воєнного стану: навчальний посібник / М. С. Коваль та ін. Львів : Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 2023. 306 с.

3. Про затвердження Рекомендацій про особливості виконання органами управління та підрозділами ДСНС завдань за призначенням у населених пунктах і на територіях під час збройної агресії : наказ ДСНС України від 02.04.2024 № 375. URL: <https://dsns.gov.ua/upload/2/0/8/0/8/1/6/rekom.pdf> (дата звернення: 19.03.2026).

4. Про затвердження Статуту дій у надзвичайних ситуаціях органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту та

Статуту дій органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту під час гасіння пожеж : Наказ МВС від 26.04.2018 № 340. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0801-18#n8> (дата звернення: 19.03.2026).

5. Насосно-рукавна всмоктувальна система з підтримуючим пристроєм : пат. 150866 Україна : А62С 27/00; № u 2021 04377; заявл. 27.07.2021; опубл. 04.05.2022, Бюл. № 18, 4 с.

6. Sowby R. B., Porter B. W. Water Supply and Firefighting: Early Lessons from the 2023 Maui Fires. *Water*. 2024, № 6(4). DOI: 10.3390/w16040600

7. Equipment for Effective Rural Water Supply Operations, Part 1. Fire apparatus and emergency equipment. URL: <https://www.fireapparatusmagazine.com/equipment/equipment-for-effective-rural-water-supply-operations-part-1/> (дата звернення: 19.03.2026).

8. Hao J., Yu C., Fu Y., Zhang P., Hou D., Shen Y., Yuan J. Study on the Cavitation Performances and Unsteady Characteristics of a Centrifugal Fire Pump. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2025. Vol. 18(12), P. 3036–3052. DOI: 10.47176/jafm.18.12.3577.

9. Osman F. K., Zhang J., Lai L., Kwarteng A. A. Effects of Turbulence Models on Flow Characteristics of a Vertical Fire Pump. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2022. Vol. 15(6). P. 1661–1674. DOI: 10.47176/jafm.15.06.1303.

10. Jiaying Lu, Qi Chen, Xiaobing Liu, Baoshan Zhu, Shouqi Yuan. Investigation on pressure fluctuations induced by flow instabilities in a centrifugal pump. *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 258. 111805. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.111805.

11. Про затвердження розрахунку сил і засобів МНС України, необхідних для гасіння пожеж у будівлях в на територіях різного призначення : Наказ МНС України від 16.12.2011 № 1341. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v1341735-11#Text> (дата звернення: 19.03.2026).

12. Луц В. І., Чалий Д. О., Великий Я. Б. Основи підготовки пожежно-рятувальника: навчальний посібник. Львів, ПП «Видавництво «БОНА», 2023. – 456 с.

13. Мотопомпи пожежні. Пожежний захист України. URL: <https://es-101.com/ua/pozharnye-rukava-kranu-gidranty/pozharnye-motopompy/> (дата звернення: 23.04.2026).

14. Engine Pump. Koshin. URL: https://www.koshin-ltd.jp/en/products/?category_large_id=1

15. Portable pumps. Rosenbauer. URL: <https://www.rosenbauer.com/en/products/fire-fighting-systems-and-body-components/mobile-extinguishing-systems/portable-pumps>

16. Буї. Spas-Kani. URL: <https://spas-kani.com/%D0%BA%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%B3%D0%BE%D1%80%D0%B8%D0%B8/%d0%b1%d1%83%d1%97/> (дата звернення: 19.03.2026).

17. Загальна фізика : підручник / В. М. Кушнарьов та ін.. Київ : Каравела, 2021. 464 с.

REFERENCES

1. Derzhavna sluzhba Ukrainy z nadzvychainykh sytuatsii. (2025). *Analychna dovidka pro pozhezh ta yikh naslidky v Ukraini za 12 misiatsiv 2025 roku* [Analytical report on fires and their consequences in Ukraine for 12 months of 2025]. Retrieved from: <https://dsns.gov.ua/upload/2/5/5/1/7/8/2/analytichna-dovidka-pro-pozezi-2025.pdf> [in Ukrainian].
2. Koval, M. S., et al. (2023). *Dii pidrozdiliv DSNS Ukrainy v umovakh voiennoho stanu* [Actions of SES units of Ukraine under martial law]. Lviv State University of Life Safety. [in Ukrainian].
3. Derzhavna sluzhba Ukrainy z nadzvychainykh sytuatsii. (2024). *Pro zatverdzhennia rekomendatsii pro osoblyvosti vykonannya orhanamy upravlinnia ta pidrozdilamy DSNS zavdan za pryznachenniam u naselenykh punktakh i na terytoriiakh pid chas zbroinoi ahresii* [On approval of recommendations on the specifics of performing tasks by SES bodies and units during armed aggression] (Order No. 375). Retrieved from: <https://dsns.gov.ua/upload/2/0/8/0/8/1/6/rekom.pdf> [in Ukrainian].
4. Ministerstvo vnutrishnikh sprav Ukrainy. (2018). *Pro zatverdzhennia Statutu dii u nadzvychainykh sytuatsiakh orhaniv upravlinnia ta pidrozdiliv OPRS tserozakhystu ta Statutu dii pid chas hasinnia pozhezh* [On approval of the Statute of emergency operations and firefighting operations]. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0801-18> [in Ukrainian].
5. *Nasosno-rukavna vsmokhtuvalna systema z pidtrymuichym prystroiem* [Suction hose pumping system with supporting device]. (2022). Ukrainian patent No. 150866. [in Ukrainian].
6. Sowby, R. B., & Porter, B. W. (2024). Water supply and firefighting: Early lessons from the 2023 Maui fires. *Water*, 16(4), 600. <https://doi.org/10.3390/w16040600>
7. *Equipment for effective rural water supply operations, Part 1*. (n.d.). Fire Apparatus Magazine. Retrieved from: <https://www.fireapparatusmagazine.com/equipment/equipment-for-effective-rural-water-supply-operations-part-1/>
8. Hao, J., Yu, C., Fu, Y., Zhang, P., Hou, D., Shen, Y., & Yuan, J. (2025). Study on the cavitation performances and unsteady characteristics of a centrifugal fire pump. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 18(12), 3036–3052. <https://doi.org/10.47176/jafm.18.12.3577>
9. Osman, F. K., Zhang, J., Lai, L., & Kwarteng, A. A. (2022). Effects of turbulence models on flow characteristics of a vertical fire pump. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 15(6), 1661–1674. <https://doi.org/10.47176/jafm.15.06.1303>
10. Lu, J., Chen, Q., Liu, X., Zhu, B., & Yuan, S. (2022). Investigation on pressure fluctuations induced by flow instabilities in a centrifugal pump. *Ocean Engineering*, 258, 111805. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111805>
11. Ministerstvo nadzvychainykh sytuatsii Ukrainy. (2011). *Pro zatverdzhennia rozrakhunku syl i zasobiv MNS Ukrainy, neobkhidnykh dlia hasinnia pozhezh u budivliakh ta terytoriiakh riznoho pryznachennia* [On approval of calculation of forces and means for firefighting]. <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v1341735-11> [in Ukrainian].
12. Lushch, V. I., Chalyi, D. O., & Velykyi, Ya. B. (2023). *Osnovy pidhotovky pozhezhnoho-riatuvalnyka* [Basics of firefighter-rescuer training]. PP“Vydavnytstvo “BONA”. [in Ukrainian].
13. *Motopompy pozhezhni* [Fire motor pumps]. (n.d.). Pozhezhnyi zakhyst Ukrainy. Retrieved from: <https://es-101.com/ua/pozharnye-rukava-kranygidranty/pozharnye-motopompy/> [in Ukrainian].
14. Koshin Ltd. (n.d.). *Engine pump*. Retrieved from: https://www.koshin-ltd.jp/en/products/?category_large_id=1
15. Rosenbauer International AG. (n.d.). *Portable pumps*. Retrieved from: <https://www.rosenbauer.com/en/products/fire-fighting-systems-and-body-components/mobile-extinguishing-systems/portable-pumps>
16. Bui [Buoys]. (n.d.). Spas-Kani. Retrieved from: <https://spas-kani.com/%D0%BA%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%B3%D0%BE%D1%80%D0%B8%D0%B8/d0%b1%d1%83%d1%97/> [in Ukrainian].
17. Kushnarov, V. M., et al. (2021). *Zahalna fizyka* [General physics]. Kavela. [in Ukrainian].

© В. І. Луц, Я. Б. Великий, Р. М. Конанець, А. С. Лин, Р. В. Пархоменко, Ю. Т. Судніцин, Я. І. Федюк, Ю. І. Панчишин, М. А. Кривуненко

Оглядова стаття

Дата першого надходження статті до видання: 02.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 29.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.48.2026.10>

М. В. Осадчук¹, В. В. Ніжник¹, К. Д. Алмазов²

¹ *Інституту наукових досліджень з цивільного захисту НУЦЗ України, м. Київ, Україна*

² *Академія Міністерства надзвичайних ситуацій, м. Баку, Азербайджан*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4584-3541> – М. В. Осадчук

<https://orcid.org/0000-0003-3370-9027> – В. В. Ніжник

<https://orcid.org/0000-0001-6483-351X> – К. Д. Алмазов

✉ maximusfire1989@gmail.com

УДОСКОНАЛЕННЯ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ В ЕКОСИСТЕМАХ ЗА ДОПОМОГОЮ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ

Актуальність проблеми. Встановлено актуальність питання створення нових сучасних технічних засобів для гасіння пожеж в екосистемах, зокрема із застосуванням компресійної піни в якості вогнегасної речовини.

Аналіз останніх досліджень. Проаналізовано найбільш поширені та ефективні заходи боротьби з лісовими пожежами у світі. Наведено їх основні переваги та недоліки.

Методи профілактики та моніторингу. Акцентовано увагу на тому, що профілактика лісових пожеж здійснюється за рахунок проведення агітаційно-роз'яснювальної роботи серед населення, заборони спалювання сухої трави, сміття та рослинних залишків, обмеження доступу до лісових масивів у пожежонебезпечний період, а також встановлення попереджувальних знаків і облаштування місць для відпочинку з дотриманням правил пожежної безпеки. Профілактика лісових пожеж також здійснюється за рахунок моніторингу лісових масивів, регулярного патрулювання лісів, використання сучасних технологій таких, як розвідувальні дрони та супутники та навіть використання штучного інтелекту. Вказані заходи допомагають вчасно виявити осередки загоряння та оперативно відреагувати на ранній стадії виникнення пожежі, що значно спрощує боротьбу з вогнем та сприяє мінімізації збитків від пожежі. Наведено ілюстрації кожного із зазначених заходів.

Об'єкт та предмет дослідження. Окрему увагу приділено методу гасіння пожеж у природних екосистемах шляхом застосування загороджувальних смуг із компресійної піни. З'ясовано, що ліквідація низових пожеж за допомогою загороджувальних смуг із компресійної піни є сучасною та ефективною технологією, яка дозволяє значно підвищити швидкість та якість гасіння пожеж у лісах, степах та на торфовищах. Цей метод поєднує ізолюючі властивості води та спеціальних піноутворювачів, створюючи стійкий бар'єр на шляху вогню. Компресійна піна (CAF – Compressed Air Foam) – це суміш води, піноутворювача (поверхнево-активної речовини) та стисненого повітря. На відміну від звичайної піни, що утворюється шляхом ежекції (підсмоктування повітря), компресійна піна створюється в спеціальній камері під тиском. Це дозволяє отримати однорідну, дрібнодисперсну та стабільну структуру з бульбашок однакового розміру.

Результати. З'ясовано, що основними перевагами компресійної піни є висока адгезія, низька щільність, стійкість та висока змочувальна здатність. Недоліками використання компресійної піни для гасіння лісових пожеж є висока вартість обладнання, необхідність постійних витрат на спеціальні піноутворювачі, екологічний аспект, обмежена ефективність при верхових пожежах.

Ключові слова: екосистеми, гасіння пожеж, методи гасіння, загороджувальні смуги, компресійна піна, лісові пожежі.

IMPROVING FIRE SUPPRESSION IN ECOSYSTEMS USING COMPRESSED FOAM

Relevance of the Problem. The relevance of developing new, modern technical means for firefighting in ecosystems has been established, particularly through the use of compressed foam as a fire-extinguishing agent.

Analysis of recent studies and measures. The most common and effective measures for combating forest fires worldwide have been analyzed. Their main advantages and disadvantages are presented.

Prevention and monitoring methods. Emphasis is placed on the fact that forest fire prevention is achieved through public awareness and education campaigns, banning the burning of dry grass, trash, and plant debris, restricting access to forested areas during fire-prone periods, as well as installing warning signs and setting up rest areas in compliance with fire safety regulations. Forest fire prevention is also carried out through the monitoring of forest areas, regular forest patrols, the use of modern technologies such as reconnaissance drones and satellites, and even the use of artificial intelligence. These measures help to detect fire outbreaks in a timely manner and respond quickly at the early stages of a fire, which significantly simplifies firefighting efforts and helps minimize fire damage. Illustrations of each of these measures are provided.

Object and subject of the study. Particular attention is paid to the method of extinguishing fires in natural ecosystems through the use of firebreaks made of compressed foam. It has been established that the suppression of ground fires using firebreaks made of compressed foam is a modern and effective technology that significantly improves the speed and quality of firefighting in forests, steppes, and peatlands. This method combines the insulating properties of water and special foaming agents, creating a stable barrier in the path of the fire. Compressed air foam (CAF) is a mixture of water, a foaming agent (surfactant), and compressed air. Unlike conventional foam, which is formed by ejection (air suction), compressed air foam is created in a special pressurized chamber. This allows for a homogeneous, fine-pored, and stable structure consisting of bubbles of uniform size.

Results. It has been established that the main advantages of compression foam are high adhesion, low density, stability, and high wetting ability. The disadvantages of using compression foam for extinguishing forest fires include the high cost of equipment, the need for ongoing expenses for special foam concentrates, environmental concerns, and limited effectiveness in crown fires.

Key words: ecosystems, firefighting, fire suppression methods, firebreaks, compression foam, forest fires.

Постановка проблеми. Пожежі в екосистемах є однією з найбільш руйнівних загроз для природного середовища та людства. Щороку мільйони гектарів лісів, степів та інших природних ландшафтів охоплюються вогнем, що призводить до непоправних екологічних, економічних та соціальних наслідків[1, 2]. Сприяє цьому і глобальне потепління, значно збільшуючи ймовірність пожеж в екосистемах. За рахунок підвищення температури навколишнього середовища, збільшується посуха та відбуваються зниження опадів, що у свою чергу призводить до більш сприятливих умов для виникнення та швидкого поширення вогню.

На сьогоднішній день по всьому світу спостерігається небезпечна тенденція щодо збільшення кількості та масштабів пожеж в екосистемах, що відповідно, кратно збільшує і наслідки від таких пожеж [3]. Зокрема, небезпечними є лісові пожежі, які за сприятливих для себе обставин – погодних умов, вітру, наявності горючих матеріалів та рельєфу місцевості, можуть досить швидко збільшуватися та досягати швидкості поширення близько 100 м/хв. Стрімка динаміка пожежі,

значна віддаленість та обмежений доступ особового складу та пожежної техніки до осередку пожежі, а також відсутність в достатній кількості вододжерел для безперебійної подачі вогнегасних речовин, значно ускладнює гасіння лісових пожеж, змушуючи пожежні підрозділи в таких умовах постійно маневрувати.

В Україні, особливо в умовах тривалої повномасштабної війни [4, 5], коли бойові дії стають додатковим чинником виникнення пожеж, питання ефективного гасіння пожеж в екосистемах набуває особливого значення.

Боротьба з лісовими пожежами включає в себе широкий комплекс заходів[6, 7]. Наразі спостерігається різке збільшення ресурсів для боротьби з пожежами. Це призводить до постійного пошуку нових засобів гасіння лісових пожеж, а також до вдосконалення існуючих методів і технічних засобів. Одним із прогресивних напрямків є гасіння лісових пожеж компресійною піною.

Враховуючи вищевикладене, набуває актуальності питання створення нових сучасних технічних засобів для гасіння пожеж в екосистемах[8],

зокрема із застосуванням компресійної піни в якості вогнегасної речовини [9,10].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Стаття українських дослідників Ліхнівського Р. В., Білошицького М. В., Жартовського С. В., Копильного М. І. та Корнієнко О. В. [11] присвячена експериментальному визначенню впливу розведення розчинів вогнезахисних засобів на ефективність загороджувальних смуг.

У статті [11] проведено дослідження з визначення ефективності загороджувальних смуг, утворених нанесенням розчинів вогнезахисних засобів. Оцінено вплив розведення робочого розчину водою на ефективність смуг у локалізації низових лісових пожеж слабкої інтенсивності.

У публікації українських дослідників Ліхнівського Р. В., Білошицького М. В., Боровикова В. О. та ін. [12] змодельовано низову лісову пожежу слабкої інтенсивності, описано створення захисної смуги для локалізації пожежі. Показано ефективність застосування водорозчинного засобу із вогнезахисними властивостями у локалізації пожежі.

За результатами проведених досліджень встановлено, що загороджувальна смуга шириною 0,5 м, створена з робочого розчину засобу з вогнезахисними властивостями на основі фосфоромісних сполук з витратою у 500 г/м², здатна перешкоджати поширенню полум'я лісовою підстилкою, що є свідченням ефективності її застосування під час боротьби принаймні з низовими лісовими пожежами.

У статті українських науковців Поповича В. В. та Гапало А. І. [13] висвітлено результати досліджень моніторингу довготривалого впливу лісових пожеж на один із найважливіших компонентів екосистеми – едафотоп.

Проведено аналіз наукових та літературних джерел щодо проблематики впливу лісових пожеж на едафотоп у вітчизняному та зарубіжному контекстах. Досліджено модельне вогнище стосовно температурного та вологісного режимів. Встановлено температуру полум'я на різних ділянках модельного вогнища. Встановлено потужність еквівалентної дози фотонного іонізуючого випромінювання на місці проведення експерименту.

У публікації вітчизняних науковців Сукача Р. Ю., Ковалишина В. В. та Кириліва Я. Б. [14, 15] розглянуто причини виникнення торф'яних пожеж в екосистемах торф-ліс, а також їх негативний вплив на території, транспорт та людей. Розглянуто умови протікання таких пожеж та їх характерні особливості. Описано тактику гасіння торф'яних пожеж в екосистемах торф-ліс різними способами, які дозволяють ліквідувати такі пожежі. Розроблено конструкцію спеціального

пожежного ствола для гасіння торф'яних пожеж в екосистемах торф-ліс, що укривається в шар пористих речовин, землі, торфу на глибини до 5 м. Проведено попередні випробування експериментального зразка ствола спеціального пожежного, які показали його ефективність.

Публікація пакистанських науковців Afzaal Hamra та Zafar Nazir Ahmad [16] присвячена алгоритму виявлення та гасіння лісових пожеж «Forest Fire Detection and Extinguishing Algorithm» (FFDEA) з використанням бездротових мереж (WSAN) для виявлення та гасіння пожежі.

У публікаціях [17, 18] розглядаються алгоритми та актуальність гасіння пожеж нафтопродуктів зокрема компресійною піною, як одного з перспективних напрямків гасіння пожеж на який необхідно звернути увагу в подальших дослідженнях.

Слід відмітити, що вищезазначені роботи [11–18] не містять досліджень щодо ефективності гасіння пожеж в екосистемах за допомогою компресійної піни.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою цього дослідження є визначення загальносвітових підходів до використання систем пожежогасіння компресійною піною в екосистемах. Для досягнення цієї мети поставлено завдання щодо аналізу найбільш поширених та ефективних заходів боротьби з лісовими пожежами у світі. У цій статті застосовано аналітичний метод дослідження.

Виклад основного матеріалу дослідження. Проаналізуємо найбільш поширені та ефективні заходи боротьби з лісовими пожежами у світі [19].

Перш за все слід зазначити, що профілактика пожеж здійснюється за рахунок проведення агітаційно-роз'яснювальної роботи серед населення, заборони спалювання сухої трави, сміття та рослинних залишків, обмеження доступу до лісових масивів у пожежонебезпечний період [20, 21], а також встановлення попереджувальних знаків і облаштування місць для відпочинку з дотриманням правил пожежної безпеки.

Профілактика лісових пожеж також здійснюється за рахунок моніторингу лісових масивів [20, 21], регулярного патрулювання лісів, використання сучасних технологій, таких як розвідувальні дрони та супутники та навіть використання штучного інтелекту. Вказані заходи допомагають вчасно виявити осередки загоряння та оперативно відреагувати на ранній стадії виникнення пожежі, що значно спрощує боротьбу з вогнем та сприяє мінімізації збитків від пожежі [11,12].

Крім того, для профілактики лісових пожеж ефективним заходом є роботи з прокладання



Рис. 1. Протипожежний рів

протипожежних ровів. Протипожежний рів – це один з найпростіших ефективних інженерних заходів, що призначений для утворення перешкоди на шляху розповсюдження вогню. Основна ідея полягає в тому, щоб фізично не допустити руху полум'я та горючих матеріалів (таких, як суха трава, листя, гілки) через викопану траншею (рисунок 1).

До переваг протипожежних ровів слід віднести високу ефективність проти низових пожеж, можливість використання в якості водозбірника, оперативне їх формування, значний час експлуатації при належному та постійному догляді.

До недоліків протипожежних ровів слід віднести:

- відносно високу вартість (копання ровів, особливо глибоких та довгих, вимагає значних фінансових вкладень, використання важкої техніки);
- обмежену можливість застосування (габаритна інженерна техніка має обмежену прохідність і у важкодоступних щільнозасаджених місцях проїхати не в змозі);
- перешкоду для пересування (рови можуть створювати перешкоди для вільного пересування тварин, людей та транспорту, що може бути проблематично для екосистеми або для господарської діяльності);
- потребу у постійному догляді (рови потребують регулярного догляду, вони схильні до заростання травою, чагарниками, наповнення опалим листям, гілками, сміттям).

Наступним засобом для боротьби з лісовими пожежами є використання пожежного ґрунтометача. Дана технологія є досить особливою, через що має обмежене застосування, за виключенням окремих країн. Наша країна не є виключенням, хоча і має напрацювання в цьому напрямку [3]. Але масового використання у нашій країні ця

технологія так і не отримала через переважно складний рельєф розташування лісів.

Пожежний ґрунтометач є унікальною машиною, яка може виконувати одночасно дві функції – створення мінералізованих смуг та безпосередньо закидання полум'я ґрунтом. Він працює за принципом викидання ґрунту, взятого з місця проходження машини, на крайку пожежі або для формування захисної смуги. Зазвичай це навісне обладнання до трактора або спеціально розроблена самохідна установка. Основним недоліком ґрунтометача є можливість використання його лише на обмеженій рівнинній місцевості. Це суттєво звужує спектр можливостей і тим самим змушує шукати більш ефективні альтернативні варіанти для гасіння лісових пожеж у важкодоступних місцях. Але все ж таки в окремих країнах, зокрема в Іспанії ця технологія є доволі ефективною та доволі широко використовується з постійним її вдосконаленням (рисунок 2).

Далі проаналізуємо найбільш поширений засіб для ліквідації надзвичайних ситуацій, який застосовується не лише під час гасіння лісових пожеж, але й у більшості інших випадків, де це технічно можливо та доцільно. Йдеться про пожежні автоцистерни, що є основним видом техніки пожежно-рятувальних підрозділів.

Використання пожежних автоцистерн у лісовій місцевості має свою специфіку, оскільки умови тут значно відрізняються від міських. [22] Тому в лісовій місцевості ефективніше використовувати пожежні автомобілі підвищеної прохідності. Пожежні автомобілі підвищеної прохідності демонструють високу ефективність у процесі ліквідації лісових пожеж завдяки здатності здійснювати пересування у важкодоступних природних умовах, де експлуатація звичайної техніки є обмеженою або неможливою. Високий рівень маневреності, прохідності



Рис. 2. Пожежний ґрунтометач «Еxtinguición incendios tierra-tierra» іспанської фірми EXiTT

та автономності цих транспортних засобів забезпечує можливість оперативної доставки особового складу, пожежно-технічного обладнання та необхідного запасу води безпосередньо до осередків займання. Це у свою чергу сприяє скороченню часу реагування та підвищенню ймовірності локалізації пожеж на початкових стадіях їх розвитку. Серед автомобілів підвищеної прохідності слід виокремити наступні, що застосовуються найчастіше в Україні а саме: Mercedes-Benz Unimog, АЛП-7 (55S18)-538I IVECO Eurocargo 4 × 4 ЛПМ-2.2-10 (на базі LKT-81-04), АЦ (Л) – 1,0-30-4ВР (на базі ГАЗ-3308), АЛП-10(66)-265 (на базі ГАЗ-66), АЦ(Л)-1,6-30-2ВЗ (на базі ГАЗ-3308), АЦ-30 (на базі МАЗ-54342), АЦ ПЛ-2,5-6-20 (на базі КамАЗ-4326). Сучасний пожежний автомобіль для гасіння лісових пожеж АЛП-7 (55S18)-538I, який було модернізовано в Україні зображено на (рис. 3).

Слід відзначити основні переваги пожежних автоцистерн під час гасіння лісових пожеж: можливість швидкого реагування та маневрування у відносно доступних зонах, наявність власної

ємності з водою (запас від 2 до 8 м³ залежно від моделі), здатність до роботи у комплексі з іншими засобами гасіння, зокрема з мотопомпами.

Незважаючи на те, що пожежні автоцистерни мають численні переваги та займають домінуючу позицію серед технічних засобів пожежогасіння все ж таки в них є і ряд недоліків, а саме:

- обмежений запас води, що вимагає частого підвозу або організації пунктів заправки;
- залежність від проїзної здатності доріг і рельєфу місцевості, що ускладнює доступ до окремих осередків займання;
- підвищений ризик потрапляння техніки та особового складу в зону швидкого поширення вогню;
- значні витрати пального при роботі у важко-доступних районах;
- потреба у високому рівні технічного обслуговування та спеціальної підготовки водіїв;
- обмежена ефективність у випадках, коли пожежа охоплює великі площі, що вимагає авіаційної чи комбінованої підтримки.



Рис. 3. Пожежний автомобіль для гасіння лісових пожеж АЛП-7 (55S18)-538I

Авіаційні засоби відіграють важливу роль у боротьбі з лісовими пожежами [23–27], особливо в умовах, коли наземна техніка не може оперативно дістатися до епіцентру пожежі.

У статті [23] розглядаються питання координації та управління авіаційними підрозділами під час ліквідації лісових пожеж. Основна увага приділяється логістиці та взаємодії різних служб для підвищення оперативності реагування.

Робота присвячена фізико-математичному моделюванню поведінки водяних крапель, що скидаються з літаків [24]. Автор шукає оптимальні параметри розпилення рідини для досягнення максимального ефекту гасіння вогню з урахуванням висоти та швидкості польоту.

[25] Це аналітичний огляд сучасного стану та перспектив розвитку пожежної авіації. У матеріалі висвітлюються глобальні тренди модернізації техніки та впровадження нових технологій для боротьби з масштабними загоряннями.

[26] Стаття аналізує закордонний досвід використання авіації для гасіння екосистемних пожеж. Акцентується увага на технічних характеристиках спецтехніки та ефективних методах скидання вогнегасних речовин, які застосовуються в міжнародній практиці.

Специфіка лісового господарства України та викликів, пов'язаних із пожежною безпекою розглядається у дослідженні [27]. Автори пропонують стратегічні шляхи вдосконалення системи моніторингу та технічного переоснащення лісопожежних служб.

Використання літаків-водозливів та вертольотів із підвісними ємностями дає змогу здійснювати скидання значних об'ємів води або вогнегасних сумішей безпосередньо на осередок чи фронт пожежі. Залежно від тактичних завдань, авіація може застосовуватися як для безпосереднього

гасіння вогню, так і для створення протипожежних бар'єрів, що стримують його подальше поширення. Суттєвою особливістю авіаційного методу є висока мобільність та оперативність реагування, що дозволяє швидко перекидати сили на значні відстані та ліквідовувати пожежі у віддалених районах. Крім того, авіація ефективна у гірській та важкодоступній місцевості, де застосування наземних пожежних підрозділів ускладнене або неможливе. Однак робота авіаційних засобів потребує ретельної координації з наземними силами, які завершують локалізацію та ліквідацію осередків займання після проведення скидів.

Серед переваг використання авіації під час гасіння лісових пожеж варто відзначити: здатність оперативно доставляти значні об'єми води або вогнегасних сумішей у зону пожежі, можливість роботи в недосяжних для наземної техніки районах, зменшення ризику для особового складу пожежно-рятувальних підрозділів, ефективність у випадку масштабних пожеж, де необхідно швидко охолодити фронт полум'я чи створити захисні смуги.

Водночас авіаційний метод має низку суттєвих недоліків. До основних із них належать висока вартість експлуатації та обслуговування літальних апаратів, значна залежність від погодних умов (видимість, швидкість і напрямок вітру, наявність туману чи задимленості), а також обмеження у нічний час. Крім того, ефективність скидання води знижується через випаровування при високих температурах і розсіювання під час падіння з великої висоти. Важливим фактором також є наявність поблизу пожежі водоемів або спеціальних баз для забору води, що визначає оперативність повторних вильотів.

На рисунку 4 зображено гасіння лісових пожеж авіацією.



Рис. 4. Гасіння пожежі в Чорнобильській зоні літаком Ан-32П у квітні 2020 року

Як зазначено вище, прогресивним напрямком є гасіння лісових пожеж із застосуванням компресійної піни.

Далі розглянемо метод гасіння пожеж у природних екосистемах шляхом застосування загороджувальних смуг із компресійної піни. Загороджувальні смуги створені із хімічних речовин називають опорними хімічними смугами. Ліквідація низових пожеж за допомогою загороджувальних смуг із компресійної піни є сучасною та ефективною технологією, яка дозволяє значно підвищити швидкість та якість гасіння пожеж у лісах, степах та на торфовищах. Цей метод поєднує ізолюючі властивості води та спеціальних піноутворювачів, створюючи стійкий бар'єр на шляху вогню. Компресійна піна (CAF – Compressed Air Foam) – це суміш води, піноутворювача (поверхнево-активної речовини) та стисненого повітря. На відміну від звичайної піни, що утворюється шляхом ежекції (підсмоктування повітря), компресійна піна створюється в спеціальній камері під тиском. Це дозволяє отримати однорідну, дрібнодисперсну та стабільну структуру з бульбашок однакового розміру.

Основні переваги компресійної піни:

- висока адгезія. Піна щільно прилипає до будь-яких поверхонь (трави, листя, гілок, ґрунту), створюючи довготривалий ізолюючий шар;
- низька щільність. Завдяки великому вмісту повітря (співвідношення води до готової піни може сягати 1:20 і більше), вона легка і може подаватися на значні відстані та висоту.
- стійкість. Загороджувальна смуга з компресійної піни може зберігати свою структуру від кількох десятків хвилин до кількох годин, залежно від погодних умов та концентрації піноутворювача;
- висока змочувальна здатність. Вода, що вивільняється з піни, ефективно просочує горючі матеріали, знижуючи їх температуру та запобігаючи повторному займанню.

Керівник гасіння пожежі визначає напрямок та швидкість поширення вогню, рельєф місцевості та тип горючих матеріалів. На основі цих даних обирається оптимальне місце для створення загороджувальної смуги. Як правило, смугу прокладають на певній відстані перед фронтом полум'я, використовуючи природні перешкоди (дороги, просіки, річки) або створюючи мінералізовані смуги.

Для генерації компресійної піни використовуються спеціалізовані системи CAF, які можуть бути встановлені на пожежних автоцистернах, невеликих мобільних установках або навіть у ранцевих апаратах. Система складається з ємностей

для води та піноутворювача, насоса, компресора та змішувальної камери.

Оператор за допомогою пожежного ствола наносить компресійну піну на рослинність та поверхню ґрунту, формуючи суцільну, безперервну смугу необхідної ширини та висоти. Ширина смуги: Зазвичай становить від 0,5 до 1,5 метра. Висота смуги: Залежить від висоти трав'яного покриву та інтенсивності пожежі, зазвичай від 20 до 50 см.

Серед недоліків використання компресійної піни для гасіння лісових пожеж слід відзначити:

- висока вартість обладнання. Системи CAF є дорожчими за традиційні пожежні насоси;
- необхідність постійних витрат на спеціальні піноутворювачі;
- екологічний аспект. Піноутворювачі є хімічними речовинами, їх потрапляння у водойми у великих кількостях може мати негативний вплив на водні екосистеми;
- обмежена ефективність при верхових пожежах. Метод найбільш ефективний саме для низових та торф'яних пожеж. Для боротьби з верховими пожежами потрібні інші підходи, хоча піна може використовуватися для захисту крон дерев.

Висновки та напрями подальших досліджень:

1. Застосування загороджувальних смуг із компресійної піни є прогресивною технологією в боротьбі з лісовими пожежами. Вона дозволяє більш ефективно використовувати водні ресурси, підвищує безпеку пожежників та забезпечує надійну локалізацію осередків горіння в природних екосистемах.
2. В подальшому актуальним є дослідження, що направлене на розроблення нових технологій створення компресійної піни, які дозволяють отримувати її із високими витратами.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Коробкіна К. М., Рибалова О. В. Вплив лісових пожеж на стан навколишнього природного середовища. Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту : матеріали міжнар. наук.-практ. конф. молодих учених. Харків : НУЦЗУ, 2019. С. 385–386.
2. Рибак М. Лісові пожежі та їх вплив на навколишнє середовище. Актуальні питання техногенної та цивільної безпеки України : матеріали ІІ Всеукр. наук. конф. Миколаїв, 2020. С. 86–87.
3. Аналіз пожеж, що сталися в Україні за 12 місяців 2025 року. URL: <https://dsns.gov.ua/upload/2/5/5/1/7/8/2/analitichna-dovidka-pro-pozezi-2025.pdf> (дата звернення: 02.03.2026).
4. Кузик А. Д., Товарянський В. І. Вплив воєнних дій на лісові екосистеми України та їх після-

воєнне відновлення. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2023. № 27. С. 16–22. DOI: <https://doi.org/10.32447/20784643.27.2023.02>

5. Salinero E. C., Chuvieco E. *Wildland Fire Danger: Estimation and Mapping: The Role of Remote Sensing Data*. World Scientific, 2003. 264 p.

6. Орещенко А. В., Осадчий В. І., Савенець М. В., Балабух В. О. Виявлення і моніторинг потенційно небезпечних пожеж на території України за даними супутникового сканування. *Вісник Національної академії наук України*. 2020. № 11. С. 33–44.

7. Лозінська Т. П., Ситник О. С., Велика К. І. Огляд і аналіз основних аспектів протипожежного захисту лісових екосистем в умовах сьогодення. *Лісове господарство*. 2024. № 2. С. 144–153.

8. Провести дослідження ефективності загороджувальних смуг для локалізації пожеж природних екосистем із застосуванням речовин з вогнезахисними властивостями : звіт про НДР (заключний)/ О. В. Корнієнко та ін. Київ : УкрНДІЦЗ ДСНС України, 2017. 216 с. URL: <https://dsns.gov.ua/upload/9/6/2/3/2017-4-25-zvit-osvita-i-nauka-6-dovidnik-kerivnika-gasinnya-pozezi.pdf> (дата звернення: 02.03.2026).

9. Шахов С. М., Виноградов С. А. Технологія та переваги використання компресійної піни : дис. Харків : НУЦЗУ, 2017.

10. Кодрик А. І., Нікулін О. Ф., Тітенко О. М., Шахов С. М., Куртов О. В. Залежність властивостей компресійної піни від робочих параметрів процесу генерування піни. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2019. № 1 (7). С. 54–63.

11. Ліхнівський Р. В. та ін. Експериментальне визначення впливу розведення розчинів вогнезахисних речовин. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2017. № 1. С. 117–122.

12. Ковалишин В. В. та ін. Розширення галузі застосування компресійної піни. 36. наук. праць Всеукр. наук.-практ. конф. з міжнар. участю. 2022. С. 372–374.

13. Попович В., Гапало А. Температурний вплив ландшафтних пожеж на екологічний стан едафотопу. *ZN SGSP*. 2020. Vol. 76. P. 29–45.

14. автори: Сукач, Р. Ю., Ковалишин, В. В., & Кирилів, Я. Б. Тактика гасіння та протипожежне обладнання для ліквідації пожеж в екосистемах торф-ліс. *Sciences of Europe*. 2021. № 62-1. С. 44–48.

15. Сукач Р. Ю., Ковалишин В. В., Кирилів Я. Б. Зниження пожежної небезпеки торф'яників та способи підвищення ефективності їх гасіння. *Пожежна безпека*. 2019. № 35. С. 75–82.

16. Афзаал Х., Зафар Н. А. Модель виявлення та гасіння лісових пожеж за допомогою роботів. 2-а Міжнародна конференція з робототехніки та штучного інтелекту (ICRAI): матеріали конференції (листопад 2016 р.) IEEE, 2016. С. 112–117.

17. Осадчук М. В., Ніжник В. В. Актуальність застосування компресійної піни для гасіння пожеж

на трансформаторних підстанціях. *Problems of Emergency Situations* : матеріали міжнар. наук.-практ. конф. Черкаси : НУЦЗ України, 2025. С. 97–98.

18. Одинець А. та ін. Обґрунтування додаткових заходів щодо оперативних дій під час гасіння пожеж на складах нафтопродуктів в умовах бойових дій. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2022. № 1 (13). С. 72–79.

19. Кузик А. Д., Карабин О. О. Моделювання процесу поширювання лісової пожежі в умовах гірської місцевості. *Пожежна безпека*. 2005. № 6. С. 49–53.

20. Матухно В. В. та ін. Профілактика та ліквідація лісових та степових пожеж з використанням безпілотних літальних апаратів. Запобігання надзвичайним ситуаціям та їх ліквідація : матеріали круглого столу. Харків : НУЦЗУ, 2022. 232 с.

21. Міллер О. В., Судніцин Ю. Т. Вдосконалення профілактики та пожежогасіння лісових пожеж. Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям : матеріали конф. Львів : ЛДУ БЖД, 2020. С. 66–70.

22. Renkas A., Popovych V., Dominic A. Method for determining the optimal location of firefighting equipment for localization of ground forest fires. 2021. Vol. 2, No. 46. P. 144–150. DOI: <https://doi.org/10.32014/2021.2518-170X.46>

23. Мікосянчик О. О. та ін. Організаційні аспекти застосування авіаційних сил для гасіння лісової пожежі. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2021. Т. 1, № 63. С. 138–141.

24. Панченко С. Алгоритм побудови математичної моделі водяних крапель для ефективного гасіння лісових пожеж. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2024. Т. 8, № 1. С. 73–82.

25. Панченко С. Тенденції застосування авіаційної техніки для гасіння пожеж. *Надзвичайні ситуації та ліквідація*. 2021. Т. 5, № 1. С. 104–114. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524-2636.2021.5.1.104.114>

26. Мосов С. П., Горський О. М. Технічні аспекти авіаційного пожежогасіння в екосистемах. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2022. Вип. 3 (69). С. 104–111.

27. Герасименко І. М., Соловйова О. О., Пронь С. В. Перспективні напрями боротьби з пожежами у лісовому господарстві України. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2021. Т. 31, № 3. С. 27–33.

REFERENCES

1. Korobkina, K. M., & Rybalova, O. V. (2019). Vplyv lisovykh pozhezh na stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyscha [Impact of forest fires on the state of the environment]. In *Problemy ta perspektyvy zabezpechennia tsyvilnoho zakhystu* (pp. 385–386). Kharkiv : NUTSZU. [in Ukrainian].

2. Rybak, M. (2020). Lisovi pozhezhi ta yikh vplyv na navkolyshnie seredovysche [Forest fires and their impact on the environment]. In *Aktualni pytannia tekhnolohnoi ta tsyvilnoi bezpeky Ukrainy* (pp. 86–87). Mykolaiv. [in Ukrainian].

3. State Emergency Service of Ukraine. (2025). Analiz pozhezh, shcho stalysia v Ukraini za 12 misiatsiv 2025 roku [Analysis of fires in Ukraine for 12 months of 2025]. <https://dsns.gov.ua/upload/2/5/5/1/7/8/2/analitichna-dovidka-pro-pozezi-2025.pdf>
4. Kuzyk, A. D., & Tovarianskyi, V. I. (2023). Vplyv voienykh dii na lisovi ekosystemy Ukrainy ta yikh pislivoienne vidnovlennia [Impact of military actions on forest ecosystems of Ukraine and their post-war restoration]. *Visnyk Lvivskoho derzhavnoho universytetu bezpeky zhyttiedialnosti*, (27), 16–22. <https://doi.org/10.32447/20784643.27.2023.02> [in Ukrainian].
5. Salinero, E. C., & Chuvieco, E. (2003). *Wildland fire danger: Estimation and mapping: The role of remote sensing data*. World Scientific.
6. Oreshchenko, A. V., Osadchyi, V. I., Savenets, M. V., & Balabukh, V. O. (2020). Vyavlennia i monitorynh potentsiino nebezpechnykh pozhezh na terytorii Ukrainy za danymy suputnykovoho skanuvannia [Detection and monitoring of potentially dangerous fires in Ukraine using satellite data]. *Visnyk Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*, (11), 33–44. [in Ukrainian].
7. Lozinska, T. P., Sytnyk, O. S., & Velyka, K. I. (2024). Ohliad i analiz osnovnykh aspektiv protypozhezhnoho zakhystu lisovykh ekosystem v umovakh sohodennia [Review and analysis of key aspects of forest fire protection under current conditions]. *Lisove hospodarstvo*, (2), 144–153. [in Ukrainian].
8. Korniienko, O. V., et al. (2017). Provesty doslidzhennia efektyvnosti zahorodzhualnykh smuh dlia lokalizatsii pozhezh pryrodnykh ekosystem iz zastosuvanniam vohnezakhysnykh rehovyn [Study on the effectiveness of firebreaks for localization of ecosystem fires]. Kyiv : UkrNDICZ DSNS Ukrainy. <https://dsns.gov.ua/upload/9/6/2/3/2017-4-25-zvit-osvita-i-nauka-6-dovidnik-kerivnika-gasinnya-pozezi.pdf> [in Ukrainian].
9. Shakhov, S. M., & Vynohradov, S. A. (2017). Tekhnolohiia ta perevahy vykorystannia kompresiiinoi piny [Technology and advantages of compressed air foam] (Thesis). Kharkiv: NUTSZU. [in Ukrainian]
10. Kodryk, A. I., Nikulin, O. F., Titenko, O. M., Shakhov, S. M., & Kurtov, O. V. (2019). Zalezhnist vlastyvoitei kompresiiinoi piny vid robochykh parametriv protsesu heneruvannia piny [Dependence of foam properties on generation parameters]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, 1(7), 54–63. [in Ukrainian].
11. Likhnovskyi, R. V., et al. (2017). Eksperymentalne vyznachennia vplyvu rozvedennia vohnezakhysnykh rozchyniv [Experimental determination of dilution effects of fire retardant solutions]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, (1), 117–122. [in Ukrainian].
12. Kovalyshyn, V. V., et al. (2022). Rozshyrennia haluzi zastosuvannia kompresiiinoi piny [Expansion of compressed air foam applications]. In *Proceedings of the All-Ukrainian scientific-practical conference* (pp. 372–374). [in Ukrainian]
13. Popovych, V., & Hapalo, A. (2020). Temperaturnyi vplyv landshaftnykh pozhezh na ekolohichniy stan edafotopu [Temperature impact of landscape fires on soil conditions]. *ZN SGSP*, 76, 29–45.
14. Sukach, R. Y., Kovalyshyn, V. V., & Kyryliv, Y. B. (2021). Taktyka hasinnia ta protypozhezhne obladnannia dlia likvidatsii pozhezh v torfovo-lisovykh ekosystemakh [Firefighting tactics and equipment for peat-forest ecosystems]. *Sciences of Europe*, 62(1), 44–48.
15. Sukach, R. Y., Kovalyshyn, V. V., & Kyryliv, Y. B. (2019). Znyzhennia pozhezhnoi nebezpeky torfiankyv ta sposoby pidvyshchennia efektyvnosti yikh hasinnia [Reducing fire hazard of peatlands]. *Pozhezhna bezpeka*, (35), 75–82. [in Ukrainian].
16. Afzaal, H., & Zafar, N. A. (2016). Model for detection and suppression of forest fires using robots. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Robotics and Artificial Intelligence (ICRAI)* (pp. 112–117). IEEE.
17. Osadchuk, M. V., & Nizhnyk, V. V. (2025). Aktualnist zastosuvannia kompresiiinoi piny dlia hasinnia pozhezh na transformatornykh pidstantsiakh [Relevance of compressed foam for extinguishing fires at substations]. In *Problems of Emergency Situations* (pp. 97–98). Cherkasy. [in Ukrainian].
18. Odynets, A., et al. (2022). Obruntuvannia dodatkovykh zakhodiv shchodo operatyvnykh dii pid chas hasinnia pozhezh na skladakh naftoproduktiv v umovakh boiovykh dii [Justification of additional firefighting measures under combat conditions]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, 1(13), 72–79. [in Ukrainian].
19. Kuzyk, A. D., & Karabyn, O. O. (2005). Modeliuvannia protsesu poshyrennia lisovoi pozhezh v hirskii mistsevosti [Modeling forest fire spread in mountainous terrain]. *Pozhezhna bezpeka*, (6), 49–53. [in Ukrainian].
20. Matukhno, V. V., et al. (2022). Profilaktyka ta likvidatsiia lisovykh ta stepovykh pozhezh z vykorystanniam bezpilotnykh litalnykh aparativ [Prevention and suppression of fires using UAVs]. Kharkiv: NUTSZU. [in Ukrainian].
21. Miller, O. V., & Sudnitsyn, Y. T. (2020). Vdoskonalennia profilaktyky ta pozhezhogasinnia lisovykh pozhezh [Improvement of forest fire prevention and suppression]. In *Proceedings of the conference* (pp. 66–70). Lviv. [in Ukrainian].
22. Renkas, A., Popovych, V., & Dominic, A. (2021). Method for determining the optimal location of firefighting equipment for localization of ground forest fires. *Journal (unspecified)*, 2(46), 144–150. <https://doi.org/10.32014/2021.2518-170X.46>
23. Mikosiianchyk, O. O., et al. (2021). Orhanizatsiini aspekty zastosuvannia aviatsiinykh syl dlia hasinnia lisovoi pozhezh [Organizational aspects of using aviation forces]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku*, 1(63), 138–141. [in Ukrainian].

24. Panchenko, S. (2024). Alhorytm pobudovy matematychnoi modeli vodianykh krapel dlia efektyvnoho hasinnia lisovykh pozhezh [Mathematical modeling of water droplets for fire suppression]. *Nadzvychaini sytuatsii: poperedzhennia ta likvidatsiia*, 8(1), 73–82. [in Ukrainian].

25. Panchenko, S. (2021). Tendentsii zastosuvannia aviatsiinoi tekhniky dlia hasinnia pozhezh [Trends in aerial firefighting]. *Nadzvychaini sytuatsii ta likvidatsiia*, 5(1), 104–114. <https://doi.org/10.31731/2524-2636.2021.5.1.104.114> [in Ukrainian].

26. Mosov, S. P., & Horskyi, O. M. (2022). Tekhnichni aspekty aviatsiinoho pozhezhogasinnia v ekosystemakh [Technical aspects of aerial firefighting]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku*, (3), 104–111. [in Ukrainian].

27. Herasymenko, I. M., Soloviova, O. O., & Pron, S. V. (2021). Perspektyvni napriamy borotby z pozhezhamy u lisovomu hospodarstvi Ukrainy [Prospective directions of forest fire management in Ukraine]. *Scientific Bulletin of UNFU*, 31(3), 27–33. [in Ukrainian].

© М. В. Осадчук, В. В. Ніжник, К. Д. Алмазов

Оглядова стаття

Дата першого надходження статті до видання: 02.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 09.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.48.2026.11>

В.-П. О. Пархоменко, Б. М. Михалічко, О. І. Лавренюк
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

✉ vpo2018@gmail.com

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ КЛАСІВ В ТА F АЕРОЗОЛЯМИ ВОДНИХ ВОГНЕГАСНИХ РЕЧОВИН

Вступ. Технологічний прогрес людства супроводжується активним впровадженням нових матеріалів, які характеризуються підвищеною пожежною небезпекою і високими температурами горіння. У зв'язку з цим особливо актуальним є підвищення ефективності засобів пожежогасіння. Найпоширенішою вогнегасною речовиною залишається вода. Проте вона має низку недоліків: високий поверхневий натяг, низьку в'язкість, недостатню змочувальну. Це негативно впливає на ефективність гасіння пожеж, а зокрема пожеж класів В та F, призводить до збільшення витрат вогнегасної речовини, часу ліквідації пожежі та теплового навантаження на особовий склад пожежно-рятувальних підрозділів. З метою усунення цих недоліків дедалі ширше застосовують водні вогнегасні речовини, модифіковані різними добавками. Розробка нових водних вогнегасних речовин і постійне удосконалення їх рецептур викликає необхідність об'єктивної оцінки їх вогнегасної ефективності в реальних умовах застосування. У зв'язку з цим існуючі методики випробувань водних вогнегасних речовин потребують удосконалення.

Мета. Удосконалити методику проведення експериментальних досліджень ефективності модифікованих водних вогнегасних речовин для гасіння пожеж класів В та F.

Методи. Аналітичний метод досліджень, який базується на обробці інформації щодо методик проведення експериментальних досліджень з визначення ефективності гасіння пожеж водними вогнегасними речовинами.

Результати. Проаналізовано існуючі методики визначення ефективності гасіння модельних вогнищ класів В та F. Розроблено установку для аерозольного подавання ВВР, що складається з ємності (резервуару) для ВВР, насадки-розприскувача для подачі аерозолю ВВР, композитного балону з повітрям ємністю 6,8 л, оснащеного манометром. Сформульовано детальні алгоритми підготовки, проведення вогневих випробувань та оформлення протоколів для обох класів пожеж з урахуванням вимог безпеки. Визначено основне обладнання для експериментів: металеві дека (циліндричні та прямокутні), нагрівальні пристрої, засоби фіксації (відео, секундомір), захисний одяг. Запропоновано співвідношення води та пального (1:2), тривалість попереднього горіння (60 с для класу В, 120 с для класу F), параметри подачі аерозолю. Розроблено критерії успішного гасіння (повне гасіння полум'я, відсутність повторного займання протягом 20 хв.). Показано переваги аерозольного способу подачі порівняно з компактними струменями.

Висновки. Розроблена установка та методика дають змогу об'єктивно оцінювати ефективність нових модифікованих водних вогнегасних речовин для гасіння пожеж класів В та F. Запропонований підхід є актуальним як у мирний час, так і в умовах воєнного стану, сприяє підвищенню безпеки рятувальників, скороченню витрат вогнегасної речовини та часу ліквідації пожеж. Подальші дослідження передбачають синтез нових водних вогнегасних речовин та їх практичне вогневе випробування за розробленою методикою.

Ключові слова: пожежі класу В та F, гасіння пожеж, водні вогнегасні речовини, вогнегасна ефективність.

IMPROVING FIREFIGHTING TECHNIQUES FOR CLASSES B AND F FIRES BY AQUEOUS FIRE EXTINGUISHING AGENTS IN AEROSOL FORM

Introduction. Technological progress has been accompanied by the widespread adoption of new materials characterized by increased fire hazard and high combustion temperatures. In this context, improving the effectiveness of fire extinguishing agents is particularly important. Water remains the most common fire extinguishing agent. However, it has a number of drawbacks: high surface tension, low viscosity, and insufficient wetting ability. This negatively affects the effectiveness of fire suppression, particularly for Class B and F fires, leading to increased consumption of the extinguishing agent, longer fire suppression times, and a greater thermal load on fire and rescue personnel. To address these shortcomings, water-based fire extinguishing agents modified with various additives are increasingly being used. The development of new water-based fire extinguishing agents and the continuous improvement of their formulations necessitate an objective assessment of their fire-extinguishing effectiveness under real-world conditions. In this regard, existing testing methods for aqueous fire extinguishing agents require improvement.

Purpose. The aim of this study is to improve the methodology for conducting experimental research to determine the fire-extinguishing effectiveness of modified aqueous fire-extinguishing agents for extinguishing Class B and F fires.

Methods. An analytical research method was employed, based on the analysis of information regarding experimental research methodologies for determining the effectiveness of fire suppression using water-based fire extinguishing agents.

Results. Existing methods for determining the effectiveness of extinguishing Class B and F model fires have been analyzed. A setup for the aerosol application of fire-retardant agents has been developed, consisting of a portable fire extinguisher (5 L), a compressed air cylinder (6.8 L), and a spray nozzle. Detailed algorithms for preparing, conducting fire tests, and documenting test reports for both fire classes have been formulated, taking safety requirements into account. The primary equipment for the experiments has been identified: metal trays (cylindrical and rectangular), heating devices, recording equipment (video, stopwatch), and protective clothing. A water-to-fuel ratio (1:2), the duration of pre-combustion (60 s for Class B, 120 s for Class F), and aerosol delivery parameters are proposed. Criteria for successful extinguishment were developed (complete extinguishment of the flame, no re-ignition within 20 minutes). The advantages of the aerosol delivery method compared to compact jets were demonstrated.

Conclusion. The developed apparatus and methodology make it possible to objectively evaluate the effectiveness of new modified aqueous fire extinguishing agents for extinguishing Class B and F fires. The proposed approach is relevant both in peacetime and under martial law, contributing to increased safety for rescue personnel, reduced consumption of fire extinguishing agents, and shorter fire suppression times. Further research will involve the synthesis of new aqueous fire-extinguishing agents and their practical fire testing using the developed methodology.

Key words: class B and F fires, fire extinguishing, aqueous fire-extinguishing agents, fire extinguishing effectiveness.

Вступ. Технологічний прогрес людства супроводжується активним впровадженням нових матеріалів, які характеризуються підвищеною пожежною небезпекою і високими температурами горіння. Тому є нагальна потреба в розробці нових ефективних вогнегасних речовин та засобів, які б давали змогу дієво ліквідувати пожежі, зумовлені горінням різних класів речовин, мінімізуючи при цьому теплове навантаження на особовий склад пожежно-рятувальних підрозділів і забезпечуючи швидке охолодження осередку горіння. Серед великої кількості вогнегасних речовин важливе місце посідають водні вогнегасні речовини (ВВР), які завдяки своїм унікальним фізико-хімічним властивостям та доволі низькій вартості, мають неабияку перспективу використання в практиці пожежогасіння.

ВВР є найбільш доступними, екологічно безпечними та універсальними засобами пожежогасіння в основному завдяки значній розчинності деяких неорганічних солей у воді та їх інгібувальному впливу на полум'я, а також завдяки високій теплоємності самої води та її здатності поглинати теплову енергію в процесі пароутворення. Використання ВВР в пожежогасінні забезпечує зниження температури горіння та запобігає повторному займанню горючих речовин, ВВР можна застосовувати на значних площах без надмірних матеріальних витрат. Тому ВВР є основними вогнегасними засобами для особового складу оперативно-рятувальної служби цивільного захисту [1–4].

Необхідність удосконалення ВВР зумовлена можливістю суттєвого підвищення їх вогнегасних

характеристик шляхом введення спеціальних хімічних добавок, які зменшують поверхневий натяг, уповільнюють випаровування та покращують змочувальну здатність. Такі модифіковані розчини демонструють вищу проникну здатність у пористі матеріали, ефективність тепловідведення та стабільність у широкому діапазоні температур, що дає змогу гасити горіння різних класів горючих речовин з мінімальною витратою ВВР.

Отже, подальша розробка нових ВВР є не лише актуальною, а й економічно виправданою, оскільки гарантує підвищення безпеки рятувальників, скорочення часу ліквідації пожеж і адаптацію до викликів сучасності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження [5–8] свідчать про значну перспективність використання ВВР з додаванням добре розчинних у воді неорганічних солей. Найчастіше використовують такі органічні солі як калій хлорид (KCl), натрій хлорид (NaCl), полігексаметиленгуанідин (ПГМГ), амоній фосфат $((\text{NH}_4)_3\text{PO}_4)$ та амоній сульфат $((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4)$. Використання в пожежогасінні таких ВВР забезпечує зниження витрати ВВР до 20 %, запобігає повторному займанню горючих речовин, скорочує час гасіння пожеж до 40 %, знижує температуру осередків горіння та рівень токсичності продуктів горіння та проявляє адаптивність до різних умов гасіння пожеж.

Додавання до води аніонних, неіоногенних, амфотерних чи цвіттер-іонних поверхнево-активних речовин (ПАР) у концентраціях 0,1–5 % знижує її поверхневий натяг до 15–25 мН/м, скорочуючи час гасіння на 20–50 % і витрату до 1/3. Використання ПАР забезпечує ефективне гасіння пожеж класів А та В, пожеж в екосистемах і пожеж за участю літій-іонних елементів електроживлення. Відомі також ВВР, які містять гелеутворювальні (Ecofloc A-07), флуорвмісні AFFF (Aqueous Film Forming Foam) та антикорозійні добавки [9–10]. Аналіз літератури свідчить про значну вогнегасну ефективність розчинених у воді неорганічних солей *d*-металів (CuCl_2), які за умов використання технологій аерозольного пожежогасіння здатні ефективно інгібувати полум'я пожеж класу В. Багато пишуть про солі купруму, але на практиці їх не використовують.

Значний вплив на ефективність гасіння пожеж різних класів має спосіб подачі ВВР в полум'я. В роботах [11–13] описано ефективність подачі струменя ВВР у вигляді аерозолу. Причому час гасіння пожеж безпосередньо залежить від типу насадки розприскувача та діаметра крапель аерозолу. Встановлено, що при зменшенні розміру крапель аерозолу ВВР від 50 до 400 мкм та

застосування форсунок із завихренням ефективність гасіння займань суттєво підвищується.

Визначення оптимальних умов та параметрів використання вогнегасних аерозолів для гасіння горіння легкозаймистих та горючих рідин на відкритому просторі за допомогою стаціонарних установок пожежогасіння висвітлено в роботі [14]. В цій роботі представлені результати вогневих випробувань з гасіння модельного вогнища 55 В за допомогою генератора вогнегасних аерозолів (ГВА). У дослідженні також проаналізовано динаміку змін площі покриття аерозолем та густоти крапель аерозолу в різних зонах конуса потоку. Показано, що густина крапель аерозолу в усіх зонах конуса перевищує значення необхідної густоти для ефективного вогнегасіння. Розроблено методику визначення параметрів ефективного використання аерозольних систем пожежогасіння на відкритих просторах. Встановлено, що успішне гасіння модельного вогнища досягається шляхом подачі аерозолу з ГВА зарядом 2800–2880 г з висоти 4,5 метра під прямим кутом. Було визначено оптимальну швидкість подачі аерозолу (160 г/с) та густина крапель аерозолу в потоці (140–180 г/м³). Тривалість подачі аерозолу становить 18–20 секунд, час утримання аерозольної хмари – 50–60 секунд, а кінцева концентрація аерозолу в хмарі – 97 г/м³.

Метою роботи є розроблення методики проведення експериментальних досліджень щодо визначення ефективності гасіння пожеж класів В та F водними вогнегасними речовинами з використанням технологій аерозольного пожежогасіння.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні задачі:

- проаналізувати існуючі вітчизняні та міжнародні методики для дослідження ефективності подачі ВВР;
- визначити та обґрунтувати необхідність обладнання для проведення експериментальних досліджень;
- розробити нову методику проведення експериментального дослідження.

Методи дослідження. Аналітичний метод досліджень, який базується на обробці інформації щодо методик проведення експериментальних досліджень з визначення ефективності гасіння пожеж водними вогнегасними речовинами.

Результати дослідження. Одним із суттєвих недоліків води як вогнегасного засобу є її низька в'язкість, високе значення поверхневого натягу та недостатня змочуваність поверхонь більшості твердих горючих матеріалів. Унаслідок низької адгезії вода погано утримується на поверхні

горючого матеріалу, швидко стікає з неї, що суттєво знижує ефективність охолодження та ізолювання зони горіння [15–17].

Подолання зазначених обмежень досягається шляхом додавання до води невеликої кількості спеціальних ПАР, які істотно підвищують ефективність ВВР.

До основних механізмів припинення горіння належать:

- перешкоджання надходженню окисника (кисню повітря) до осередку горіння;
- зниження концентрації кисню в повітрі шляхом розведення його негорючими газоподібними речовинами;
- охолодження зони горіння до температури, нижчої за температуру займання;
- зменшення концентрації горючих речовин шляхом їх розведення негорючими компонентами;
- інгібування хімічних реакцій в полум'ї;
- механічний зрив полум'я потужним струменем вогнегасної речовини.

Реалізація цих механізмів за допомогою вогнегасних речовин, що подаються технічними засобами пожежогасіння, забезпечує можливість припинення процесу горіння. Вибір конкретних способів гасіння пожеж, типу вогнегасної речовини, а також способів і засобів її доставки в осередок горіння здійснюється в кожному конкретному випадку з урахуванням масштабу пожежі, фізико-хімічних особливостей горючих матеріалів і стадії розвитку пожежі [18–21]. Тому розробка методики проведення досліджень є надзвичайно важливим аспектом проведення експериментальних досліджень, який буде впливати на ефективність ВВР.

При огляді літературних джерел та різноманітних інтернет-ресурсів зустрічається багато нормативних джерел, де описано методику випробування вогнегасних речовин та їх ефективності. Сферою нашого дослідження є огляд літературних джерел щодо випробування та ефективності вогнегасних речовин на водній основі для гасіння пожеж різних класів.

Так, нормативні документи описані в [22, 23] регламентують методику проведення експериментальних досліджень для визначення величини зниження поверхневого натягу ВВР, підвищення проникнення та вогнегасної ефективності ВВР із ПАР для гасіння пожеж класів А та В.

Для здійснення експериментального дослідження для гасіння займання класу В використовують металеве деко квадратної форми розміром 3,05 м × 6,10 м (оригінальна метрична система 10 футів × 20 футів) і глибиною 203,2 мм

(8 дюймів). Піддон заповнюється водою, глибина шару води становить 101,6 мм (4 дюйми). Як горючу речовину використовують *n*-гептан, глибина шару *n*-гептану – 50,8 мм (2 дюйми), що становить 246,06 літрів (65 галонів). Перед поданням ВВР модельне вогнище запалюють та очікують 60 секунд для нагрівання легкозаймистої рідини (ЛЗР). ВВР з ПАР об'ємом 9,5 л знаходиться у переносному водяному вогнегаснику та подається в осередок горіння за допомогою насадки-розпилювача при тиску 0,6 bar, із середньою витратою 37,9 л/хв, при цьому фіксується час гасіння.

Схожа методика випробування ВВР для гасіння пожеж різних класів представлена в документах [24–26], де, на відміну від вищевикладеної методики, використовують не лише прямокутні, але і циліндричні деко певних розмірів залежно від виду модельного вогнища. Також є відмінність у співвідношенні ЛЗР до води. В якості горючого навантаження використовують *n*-гептан у співвідношенні 2:1 до води. Цей нормативний документ встановлює межі мінімального часу подачі ВВР в осередок горіння залежно від типу модельного вогнища, які становлять від 8 до 15 с. Кількість вогнегасної речовини, яка знаходиться у вогнегаснику, повинна бути від 2 до 9 літрів залежно від типу вогнегасника.

В свою чергу в цій міжнародній документації регламентується випробування ВВР для гасіння займань класу К – займання кухонних олій та природних жирів згідно американської класифікації пожеж. Цей клас відповідає європейській класифікації пожеж класу F згідно з ДСТУ EN 2:2014. Класифікація пожеж (EN 2:1992; EN 2:1992/A1:2004, IDT) [27].

Згідно з методикою дослідження використовують комерційні фритюрниці, типові для використання у ресторанному бізнесі, які мають різний об'єм (понад 5 літрів залежно від моделі фритюрниці). Для проведення експерименту рослинну олію запалюють та витримують час вільного горіння впродовж 60 с до температури приблизно 360–380 °С. ВВР, яка знаходиться у вогнегаснику, подають через насадку-розпилювач для формування дрібнодисперсного струменя. Під час досліду засікають час, за який буде здійснено гасіння, при цьому звертають увагу на розбрикування киплячої олії, та після гасіння витримують олію протягом 20 хв для перевірки можливості виливання олії.

Крім міжнародних європейських та американських стандартів також зустрічаються локальні, наприклад прийнятий у Великій Британії [28], що регламентує методику проведення досліджень

гасіння пожеж класів А, В, С, D та F. Методика проведення випробувань гасіння займань класу В є аналогічною з попередніми методиками [22–26], різниця полягає лише в розмірах циліндричних деко, які використовуються для наповнення їх ЛЗР та водою, а саме понад 920 мм.

Що стосується вітчизняних нормативно-правових актів, які б регламентували методику проведення експериментальних досліджень для гасіння пожеж класів В та F, існує лише один акт [29]. Відповідно до вимог цього документу модельні вогнища пожежі класу В мають виготовлятися у вигляді набору циліндричних дек, зварених зі сталевих листів з внутрішнім діаметром від 920 до 1670 мм з висотою стінки 150 мм та від 1 890 до 3 000 мм з висотою стінки 200 мм. В деко потрібно заливати воду, а на шар води – шар пального від 21 до 233 літрів в такій пропорції: 1/3 води, 2/3 пального. Експеримент можна проводити як на свіжому повітрі, так і в приміщенні, але тоді повинні бути дотримані вимоги для розмірів приміщення та мінімальної площі майданчика для вогневих випробувань. Також однією з умов є те, що для кожного досліду слід використовувати свіже палне та воду. В подальшому методика проведення дослідження є схожою з представленими вище.

Для гасіння займань класу F використовують фритюрницю та металеві деко, розміри яких залежать від типу модельного вогнища. Деко модельного вогнища пожежі 5F, виготовлене зі сталевих листів завтовшки $2,0 \pm 0,25$ мм та заввишки 170 ± 10 мм, встановлене на сталевій опорній конструкції. Дека модельних вогнищ пожежі 25F, 40F та 75F, виготовлені зі сталевих листів завтовшки $2,0 \pm 0,25$ мм та заввишки 250 ± 10 мм.

Для спостереження за температурою олії встановлюють термопару на глибині 25 ± 5 мм від поверхні олії (перед її нагріванням) з таким розрахунком, щоб спай термопари знаходився на відстані не менше ніж 75 мм від стінок дека модельного вогнища пожежі. Це дає змогу реєструвати реальну температуру самозаймання олії при її нагріванні. Палаюча речовина не повинна викидатися за межі вогнища. Полум'я має бути погашено, повторного займання олії в модельному вогнищі пожежі не повинно бути. Впродовж 20 хв після повного розрядження вогнегасника не повинно відбуватися переливання горючої речовини через бортик. Вогнегасну ефективність ВВР визначають за часом гасіння полум'я модельного вогнища.

Провівши аналіз закордонних та вітчизняних методик для визначення вогнегасної ефективності ВВР для гасіння займань класів В та F можна

виділити основне обладнання для проведення експериментальних вогневих досліджень:

клас В:

- захисний одяг;
- металеві деко для наповнення водою та ЛЗР;
- джерело займання;
- установка для подачі ВВР під постійним тиском в осередок горіння;
- вода та ЛЗР, в якості горючого навантаження;
- засоби фото- та відеофіксації експерименту;
- секундомір.

клас F:

- захисний одяг;
- нагрівальний пристрій;
- металеве деко або фритюрниця;
- рослинна олія;
- установка для подачі ВВР під постійним тиском в осередок горіння;
- засоби фото- та відеофіксації експерименту;
- секундомір.

Для проведення вогневих випробувань оператор повинен бути одягнений у захисний одяг для забезпечення його від можливих небезпек, що будуть спричинені дією теплового та вогневого впливу ЛЗР. Комплект захисного одягу повинен складатися із куртки, штанів, рукавиць та каски із забралом для створення безпечних умов для оператора.

Відповідно до існуючої методики [29] в якості дека слід використовувати циліндричну ємність заповнену на 2/3 ЛЗР та на 1/3 водою. Настил під деко має бути виготовлений із твердого негорючого матеріалу і мати рівну площину.

Джерело займання може бути довільним, але повинно відповідати безпековій складовій оператора, для уникнення можливих негативних наслідків.

Нагрівальні пристрої для підігріву рослинної олії можуть бути газовими або електричними залежно від джерела живлення.

Замість класичного вогнегасника в роботі запропоновано установку (рис. 1) для аерозольного вогнегасіння, що складається з ємності для ВВР, насадки-розприскувача для подачі аерозолу ВВР, композитного балону з повітрям ємністю 6,8 л, оснащеного манометром. При відкритті запірної вентиляції балона повітря, під постійним тиском, подається в ємність з ВВР де виштовхує її через насадку-розприскувач в осередок займання.

Для проведення експериментальних досліджень в якості ЛЗР використовували бензин марок А-92, А-95 та А-100 Євро-5 Е5 [30] та дизельне паливо [31]. Для ВВР визначали середній час гасіння (Δt , с) та середній об'єм ВВР витраченої на гасіння (V , мл) порівняно із водогінною водою.

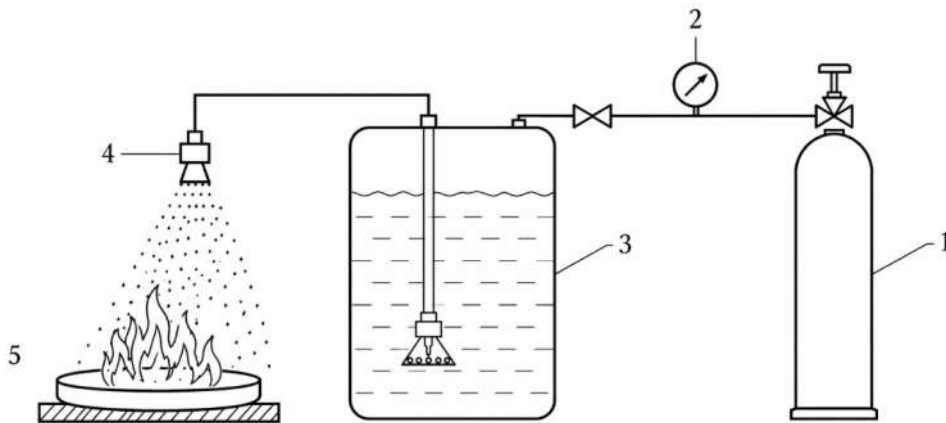


Рис. 1. Схема установки для проведення вогнегасних випробувань ВВР:

1 – балон із стиснутим повітрям, 2 – манометр, 3 – ємність для ВВР, 4 – насадка-розприскувач, 5 – деко з горючою рідиною (вогнище класу «В»)

В якості засобів фото- та відеофіксації експерименту використовували мобільний телефон закріплений на стаціонарному тримачі на безпечній відстані, приблизно 2 м від деко.

Для фіксації часу слід використовувати електронний чи механічний секундомір із точністю вимірювання не більше 1 с.

Алгоритм дій, на якому базується методика проведення експериментального дослідження для визначення ефективності гасіння пожеж класу В ВВР, є наступним.

1. Проводяться підготовчі заходи для проведення дослід: вибір захисного одягу, вибір модельного вогнища, підбір ЛЗР необхідного об'єму для відповідного типу модельного вогнища, складання установки для аерозольного пожежогасіння.

2. Підбір хімічних речовин та приготування ВВР.

3. Підготовка місця проведення вогневих випробувань: вибір місця проведення (приміщення або відкрита місцевість), температура довкілля має становити від 0 °С до 30 °С; швидкість вітру повинна бути не більше ніж 3 м/с; в деко потрібно заливати воду, а на шар води – шар пального в пропорції: 1/3 води, 2/3 пального, при чому загальний об'єм рідини повинен відповідати типу модельного вогнища; підготовка засобів фото- та відеофіксації.

4. Проведення вогневих випробувань: оператор одягнений в захисний одяг підпалює ЛЗР джерелом запалювання і витримує час вільного горіння 1 хв (це відповідає моменту, коли горіння модельного вогнища можна вважати таким, що встановилося і не пізніше ніж через 10 с приступити до його гасіння), засікаємо час початку гасіння. Далі оператор повинен привести установку для аерозольного гасіння у дію і спрямувати струмінь на модельне вогнище пожежі. Оператор фіксує

кінцевий час, коли модельне вогнище пожежі буде погашено або коли установка буде повністю розряджена. Дослід вважався успішним, коли полум'я буде повністю погашене. Для забезпечення відтворюваності та достовірності результатів проводять щонайменше 3 випробування для кожного варіанту умов експерименту.

5. Оформлення документації: оператор оформляє протокол проведення дослід, де вказує: дату проведення випробувань, умови, місце проведення випробувань, замовника випробувань, інформацію про об'єкт випробувань, методику випробувань, характеристики вимірювальних приладів та результати випробувань.

Алгоритм дій на якій базується методика проведення експериментального дослідження для визначення ефективності ВВР для гасіння пожеж класу F є наступним.

1. Проводяться підготовчі заходи для проведення дослід: вибір захисного одягу, вибір модельного вогнища, підбір необхідного об'єму рослинної олії для відповідного типу модельного вогнища, складання установки для аерозольного гасіння.

2. Підбір хімічних речовин та приготування ВВР.

3. Підготовка місця проведення вогневих випробувань: вибір місця проведення (приміщення або відкрита місцевість), температура довкілля має становити від 0 °С до 30 °С; швидкість вітру повинна бути не більше ніж 3 м/с; в деко або фритюрницю потрібно попередньо встановити термopару та налити необхідний об'єм рослинної олії, відповідно до типу модельного вогнища; підготовка засобів фото- та відеофіксації.

4. Проведення вогневих випробувань: оператор одягнений в захисний одяг вмикає нагрівальний пристрій, до моменту samozагоряння олії без стороннього втручання, samozагоряння має відбутися у проміжку часу не більше ніж 3,5 год від початку

нагрівання. Далі оператор має відімкнути джерело нагрівання і витримати час вільного горіння олії протягом 120 с. Після цього оператор повинен привести установку для аерозольного гасіння у дію і спрямувати струмінь на модельне вогнище пожежі з безпечної відстані тільки в одному напрямку або з одного боку дека модельного вогнища пожежі. Оператор фіксує кінцевий час, коли модельне вогнище пожежі буде погашено або коли установка буде повністю розряджена. Дослід вважається успішним, коли полум'я буде повністю погашене.

5. Оформлення документації: оператор оформляє протокол проведення досліду, де вказує дату проведення випробувань, умови, місце проведення випробувань, замовника випробувань, інформацію про об'єкт випробувань, методику випробувань, характеристики вимірювальних приладів та результати випробувань.

Висновки. У роботі обґрунтовано актуальність розроблення нових ВВР та способів їх подачі для ліквідації пожеж класів В та F, що набуває особливого значення в умовах підвищених ризиків, зокрема під час дії воєнного стану. Створено експериментальну установку та удосконалено методику аерозольного гасіння пожеж, яка забезпечує контрольовані умови проведення досліджень та відтворюваність результатів. Запропонована методика дає змогу здійснювати швидко первинну оцінку вогнегасної ефективності ВВР у вигляді аерозолі. Її застосування забезпечує раціоналізацію процесу відбору перспективних композицій за принципом «експрес-скринінг → відбір → стандартизовані випробування», що суттєво скорочує витрати часу та ресурсів на початкових етапах досліджень. Це створює підґрунтя для подальших досліджень, спрямованих на визначення ефективності нових ВВР для гасіння осередків пожеж класів В та F, оптимізацію параметрів їх подачі та впровадження нових технологічних рішень у практику пожежогасіння.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Карвацька М. Я., Пастухов П. В., Петровський В. Л., Лавренюк О. І., Михалічко Б. М. Вогнегасні випробування концентрованого водного розчину ферум(III) сульфату. *Пожежна безпека: зб. наук. праць*, 2022. №40. С. 55–60. URL: <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. 188–195. URL: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.03.005>
3. Карвацька М. Я., Лавренюк О. І., Михалічко Б. М. Сучасний стан і напрями вдосконалення

водних вогнегасних речовин. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*, 2023. № 1 (15) С. 92–100. URL: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1\(15\).92-100](https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1(15).92-100)

4. Anatolii Kodrik, Oleksandr Titenko, Sergiy Zhartovskyi, Andriy Borisov, Andriy Shvydenko Theoretical Prerequisites for Creating a Fire-Extinguishing Solution Based on Water-Absorbing Polymer Ecoflocf-07 for Extinguishing Fires in Ecosystems. *Key Engineering Materials*, 2022. Volume 927. P. 87–104. URL: <https://doi.org/10.4028/p-647f1v>

5. Дадашов Ільгар Фірдосі огли Розвиток наукових основ гасіння горючих рідин твердими пористими матеріалами та гелеутворюючими системами: дис. на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук: 21.06.02. Харків, 2019. 391 с.

6. Магльована Т.В. Фізико-хімічні властивості водних вогнегасних речовин на основі полігексаметиленгуанідину. *Пожежна безпека: теорія і практика: зб. наук. праць*, 2014. № 17. С. 67–72.

7. Mark Vuozzo Fire inhibitor formulation. Patent US9920250B. USA, 2018.

8. Скоробагатько Т. М., Антонов А. В., Боровиков В. О. Особливості процесів горіння дизельного біопалива, його сумішей з нафтовим дизельним паливом та процесів взаємодії вогнегасних речовин з полум'ям під час їх гасіння. *Інтернаука: Міжнародний науковий журнал*. 2 т. Розділ Технічні науки, 2019. № 11 (73). С. 52-63. URL: <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2019-11>

9. Стилик І. Г., Кодрик А. І., Борисов А. В., Тітенко О. М., Куценко М. А. Щодо можливості використання розчинів на основі сополімерів акриламідів для створення загороджувальних смуг під час пожеж в екосистемах. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*, 2024. № 2 (18) С. 75–81. URL: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2024.2\(18\).75-81](https://doi.org/10.33269/nvcz.2024.2(18).75-81)

10. Maglyovana T., Nyzhnyk T., Stas S., Kolesnikov D., Strikalenko T. Improving the efficiency of water fire extinguishing systems operation by using guanidine polymers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020. 1/10 (103). P. 20–25. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.196881>

11. Hengrui Liu, Cheng Wang, Ivan Miguel De Cachinho Cordeiro, Anthony Chun Yin Yuen, Qian Chen, Qing Nian Chan, Sanghoon Kook, Guan Heng Yeoh, Guan Heng Yeoh Critical assessment on operating water droplet sizes for fire sprinkler and water mist systems. *Journal of building engineering*. Vol. 28. 2020. pp 100999. URL: <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2019.100999>

12. Pei Zhu, Ziheng Xu, Jianguo Zhang, Quan Shao, Weiwang Chen, Hongzhou Ai Numerical Study on Fire Suppression by Water Mist in Aircraft Cargo Compartments: Effects of Spray Pattern, Droplet Size, and Nozzle Layout. *Fire*. 2024. Vol. 7, Iss: 12, pp. 481–481. URL: <https://doi.org/10.3390/fire7120481>

13. Vilfayeau S., Myers T., Marshall A., Trouvé A. Large eddy simulation of suppression of turbulent line

fires by base-injected water mist. *Proceedings of the Combustion Institute*. Volume 36, Issue 2, 2017, Pages 3287–3295. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2016.06.058>

14. Balanyuk V., Myroshkin V., Kopystynsky Y., Garasimiuk O., Girskiy O., Gyzar N. Study of Efficiency Parameters for Using Fire-Extinguishing Aerosols to Suppress Flammable Liquid Fires in Open Spaces. *Key Engineering Materials*. 2025. Vol. 1020. 141–151. URL: <https://doi.org/10.4028/p-7xOPiH>

15. Jiazheng Lu, Liang Ping, Chen Baohui, Wu Chuanping, Zhou Tiannian Investigation of the Fire-Extinguishing Performance of Water Mist with Various Additives on Typical Pool Fires. *Combustion Science and Technology*. 2019. Vol. 192, Iss: 4, pp. 592–609. URL: <https://doi.org/10.1080/00102202.2019.1584798>

16. Litao Liu, Zhenmin Luo, Tao Wang, Xi Yang, Bin Su, Yang Su Inhibitory effects of water mist containing alkali metal salts on hydrogen-natural gas diffusion flames. *International Journal of Hydrogen Energy*. Volume 51, 2024, Pages 754–764. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.457>

17. Badhuk P., Ravikrishna R. Flame inhibition by aqueous solution of Alkali salts in methane and LPG laminar diffusion flames. *Fire Safety Journal*. Volume 130, 2022, 103586. URL: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2022.103586>

18. Fanbao Chen, Bin Yao, Wan Shan Guo, Guoqing Zhu, Tingting Xu, Tao Deng, Zhen hua Jiang, Ziyang Wang, Min Peng, Xinyu Wang Experiment study on fire extinguishing effects of airflow-water synergistic jet. *Case Studies in Thermal Engineering*. Volume 49, 2023, 103367. URL: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103367>

19. Hao-wei Yao, You-Xin Li, Ke-feng Lv, Dong Wang, Jin-guang Zhang, Zhenyu Zhan, Zhenyu Wang, Xiaoge Wei, Heng-jie Qin Numerical Simulation Analysis of the Transformer Fire Extinguishing Process with a High-Pressure Water Mist System under Different Conditions. *Computer Modeling in Engineering & Sciences* 2023, 136(1), 733-747. URL: <https://doi.org/10.32604/cmes.2023.022155>

20. Robinet, A., Chetehouna, K. A Review of Additives for Water Mist Fire Suppression Systems. *Fire Technol*. 2024. Vol. 60, 2923-2961. URL: <https://doi.org/10.1007/s10694-024-01570-4>

21. Sravan Bokka, Srungarpu N. Achary, Anirban Chowdhury A simple and economical fire test setup for examining the fire retardancy/extinguishing ability of water additive fire-retardant materials on class A fires. *Fire and Materials*. 2023. Vol. 48 (1). URL: <https://doi.org/10.1002/fam.3169>

22. NFPA 18 Standard on Wetting Agents, 2021.

23. NFPA 18A Standard on Water Additives for Fire Control and Vapor Mitigation, 2022.

24. ISO 7165:2017 Firefighting – Portable fire extinguishers – Performance and construction

25. NFPA 10 Standard for Portable Fire Extinguishers, 2026.

26. UL 711-2018 UL Standard for Safety Rating and Fire Testing of Fire Extinguishers.

27. ДСТУ EN 2:2014 Класифікація пожеж (EN 2:1992; EN 2:1992/A1:2004, IDT).

28. BS EN 3-7:2004+A1:2007 Portable fire extinguishers – Characteristics, performance requirements and test methods.

29. ДСТУ EN 3-7:2014 Вогнегасники переносні. Частина 7. Характеристики, вимоги до робочих параметрів і методи випробувань (EN 3-7:2004+A1:2007, IDT).

30. ДСТУ 7687:2015 Бензини автомобільні Євро. Технічні умови.

31. ДСТУ 7688:2015 Паливо дизельне Євро. Технічні умови.

REFERENCES

1. Karvatska, M. Ya., Pastukhov, P. V., Petrovskii, V. L., Lavreniuk, O. I., & Mykhalichko, B. M. (2022). Vohnehasni vyprobuvannya kontsetrovanoho vodnoho rozchynu ferum(III) sul'fatu [Fire-extinguishing tests of concentrated aqueous solution of iron(III) sulfate]. *Pozhezhna bezpeka*, 40, 55–60. <https://doi.org/10.32447/20786662.40.2022.06> [in Ukrainian].

2. Mykhalichko, V., Lavrenyuk, N., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.03.005>

3. Karvatska, M. Ya., Lavreniuk, O. I., & Mykhalichko, B. M. (2023). Suchasnyi stan i napriamy vdoskonalennia vodnykh vohnehasnykh rehovyn [Current state and directions for improving water-based fire-extinguishing agents]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, 1(15), 92–100. [https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1\(15\).92-100](https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1(15).92-100) [in Ukrainian].

4. Kodrik, A., Titenko, O., Zhartovskyi, S., Borisov, A., & Shvydenko, A. (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. <https://doi.org/10.4028/p-647f1v>

5. Dadashov, I. F. (2019). Rozvytok naukovykh osnov hasinnia horiuchykh ridyn tverdymy porystymy materialamy ta heletuvoriuiuchymy systemamy [Development of scientific foundations for extinguishing flammable liquids using porous materials and gel-forming systems] (Doctoral dissertation). Kharkiv. [in Ukrainian] [in Ukrainian].

6. Mahlova, T. V. (2014). Fyzyko-khimichni vlastyvoli vodnykh vohnehasnykh rehovyn na osnovi poliheksametylenhuanidynu [Physicochemical properties of water-based fire extinguishing agents based on polyhexamethylene guanidine]. *Pozhezhna bezpeka: teoriia i praktyka*, 17, 67–72. [in Ukrainian].

7. Vuozzo, M. (2018). Fire inhibitor formulation. US Patent No. 9920250B.

8. Skorobahatko, T. M., Antonov, A. V., & Borovykov, V. O. (2019). Osoblyvosti protsesiv horinnia dyzelnoho biopalyva ta yoho sumishei [Combustion processes of diesel biofuel mixtures and interaction with extinguishing agents]. *Internauka: Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal*, 11(73), 52–63. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2019-11> [in Ukrainian].
9. Stylyk, I. H., Kodrik, A. I., Borisov, A. V., Titenko, O. M., & Kutsenko, M. A. (2024). Shchodo mozhlivosti vykorystannia rozchyniv na osnovi sopolimeriv akrylamidu [On the possibility of using acrylamide copolymer solutions]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, 2(18), 75–81. [https://doi.org/10.33269/nvcz.2024.2\(18\).75-81](https://doi.org/10.33269/nvcz.2024.2(18).75-81) [in Ukrainian].
10. Mahlovana, T., Nyzhnyk, T., Stas, S., Kolechnikov, D., & Strikalenko, T. (2020). Improving efficiency of water fire extinguishing systems using guanidine polymers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/10(103), 20–25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.196881>
11. Liu, H., Wang, C., Cordeiro, I. M. D. C., Yuen, A. C. Y., Chen, Q., Chan, Q. N., Kook, S., & Yeoh, G. H. (2020). Critical assessment on operating water droplet sizes for fire sprinkler and water mist systems. *Journal of Building Engineering*, 28, 100999. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2019.100999>
12. 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. *Fire*, 7(12), 481. <https://doi.org/10.3390/fire7120481>
13. Vilfayeau, S., Myers, T., Marshall, A., & Trouvé, A. (2017). Large eddy simulation of suppression of turbulent line fires by water mist. *Proceedings of the Combustion Institute*, 36(2), 3287–3295. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2016.06.058>
14. Balanyuk, V., Myroshkin, V., Kopystynsky, Y., Garasimiuk, O., Girskiy, O., & Gyzar, N. (2025). Study of efficiency parameters for fire-extinguishing aerosols. *Key Engineering Materials*, 1020, 141–151. <https://doi.org/10.4028/p-7xOPiH>
15. Lu, J., Ping, L., Chen, B., Wu, C., & Zhou, T. (2019). Fire-extinguishing performance of water mist additives. *Combustion Science and Technology*, 192(4), 592–609. <https://doi.org/10.1080/00102202.2019.1584798>
16. Liu, L., Luo, Z., Wang, T., Yang, X., Su, B., & Su, Y. (2024). Inhibitory effects of water mist containing alkali metal salts. *International Journal of Hydrogen Energy*, 51, 754–764. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.457>
17. Badhuk, P., & Ravikrishna, R. (2022). Flame inhibition by aqueous alkali salts. *Fire Safety Journal*, 130, 103586. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2022.103586>
18. Chen, F., Yao, B., Guo, W. S., Zhu, G., Xu, T., Deng, T., Jiang, Z., Wang, Z., Peng, M., & Wang, X. (2023). Airflow-water synergistic jet fire extinguishing. *Case Studies in Thermal Engineering*, 49, 103367. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103367>
19. Yao, H. W., Li, Y. X., Lv, K. F., Wang, D., Zhang, J. G., Zhan, Z., Wang, Z., Wei, X., & Qin, H. J. (2023). Numerical simulation of transformer fire extinguishing. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 136(1), 733–747. <https://doi.org/10.32604/cmescs.2023.022155>
20. Robinet, A., & Chetehouna, K. (2024). A review of additives for water mist fire suppression systems. *Fire Technology*, 60, 2923–2961. <https://doi.org/10.1007/s10694-024-01570-4>
21. Bokka, S., Achary, S. N., & Chowdhury, A. (2023). Fire test setup for water additive materials. *Fire and Materials*, 48(1). <https://doi.org/10.1002/fam.3169>
22. NFPA. (2021). *NFPA 18 Standard on wetting agents*.
23. NFPA. (2022). *NFPA 18A Standard on water additives for fire control and vapor mitigation*.
24. ISO. (2017). *ISO 7165: Firefighting – Portable fire extinguishers – Performance and construction*.
25. NFPA. (2026). *NFPA 10 Standard for portable fire extinguishers*.
26. Underwriters Laboratories. (2018). *UL 711 Rating and fire testing of fire extinguishers*.
27. DSTU EN 2:2014 *Classification of fires*. [in Ukrainian].
28. *BS EN 3-7:2004+A1:2007 Portable fire extinguishers*.
29. *DSTU EN 3-7:2014 Portable fire extinguishers – Characteristics and tests*. [in Ukrainian]
30. *DSTU 7687:2015 Automotive gasoline Euro*. [in Ukrainian].
31. *DSTU 7688:2015 Diesel fuel Euro. Specifications* [in Ukrainian].

© В.-П. О. Пархоменко, Б. М. Михалічко, О. І. Лавренюк

Оглядова стаття

Дата першого надходження статті до видання: 08.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 05.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.48.2026.12>

Н. Ю. Соляник¹, О. Б. Назаровець²

¹ *Печерське районне управління цивільного захисту, превентивної діяльності та взаємодії з органами державної влади ГУ ДСНС України, м. Київ, Україна*

² *Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна*

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5850-1360> – Н. Ю. Соляник

<https://orcid.org/0000-0003-4532-9259> – О. Б. Назаровець

✉ o.nazarovets@ldubgd.edu.ua

РИЗИКИ ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ У ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ ТА ШЛЯХИ ЇХ МІНІМІЗАЦІЇ

Вступ. Враховуючи ситуацію в енергетичному секторі України, попит на фотоелектричні системи (далі – ФЕС) продовжує зростати. Зокрема, спостерігається встановлення ФЕС на об'єктах критичної інфраструктури, закладах охорони здоров'я [1], закладах освіти [2] та багатоквартирних житлових будинках [3], з метою енергетичної незалежності та економії. Враховуючи, що системи встановлюються вже на існуючі будівлі/споруди, ФЕС в такому випадку не замінює звичних будівельних матеріалів проте складає додаткове горюче навантаження. Загалом, ФЕС поділяють на дві категорії [4]: ВІРV та ВАРV. Принцип ВІРV полягає в тому, що звичні будівельні матеріали (металочерепиця, скління, матеріали для облицювання фасаду тощо) замінюються на фотоелектричні компоненти. ВАРV – це ФЕС, що кріпляться вже на існуючі будівлі/споруди, враховуючи це, дана категорія систем є більш поширена, через економічний аспект, оскільки не передбачає капітального ремонту.

Мета: Метою роботи є комплексний аналіз пожежонебезпечних факторів, пов'язаних із експлуатацією з'єднувачів постійного струму типу МС-4 у ФЕС типу ВАРV, визначення основних дефектів під час монтажу та експлуатації, що призводять до пожежі, а також розробка рекомендацій щодо мінімізації ризиків шляхом удосконалення проектних рішень та технічного обслуговування.

Методи: Для досягнення мети роботи було проведено експериментальні дослідження з'єднувачів постійного струму МС-4 в умовах струмових перевантажень також застосовано метод аналізу та порівняння даних.

Результати: Експериментальні методи показали, що з'єднувачі постійного струму МС-4 вітчизняного виробника під час випробування досягли значних температур, що за умови відсутності протипожежних відстаней спричинить пожежу. Аналіз причин виникнення пожеж на ФЕС в Україні та закордоном показав, що з'єднувачі є одним з ключових питань пожежної безпеки ФЕС, що підкреслює актуальність досліджень. Запропоновано превентивні заходи спрямовані на запобігання пожеж на ФЕС типу ВАРV та мінімізацію ризиків пожежної небезпеки.

Висновки: Аналіз статистики пожеж в Україні у 2023–2025 роках показав, що всі зафіксовані випадки стосувалися саме систем типу ВАРV, тоді як на ВІРV пожеж не виникало. Це свідчить про ширше використання дахових та фасадних систем, які створюють додаткове горюче навантаження до існуючих будівель і ускладнюють процес ліквідації пожеж. Проведений аналіз та експериментальні дослідження підтвердили, що з'єднувачі постійного струму типу МС-4 є одним із найбільш пожежонебезпечних елементів фотоелектричних систем типу ВАРV. Саме вони найчастіше стають осередком виникнення коротких замикань та струмових перевантажень, що призводить до утворення електричної дуги та термічної деструкції матеріалів. Результати випробувань показали, що вітчизняні зразки з'єднувачів значно поступаються закордонним аналогам за стійкістю до перевантажень. Запропоновані превентивні заходи спрямовані на зменшення ймовірності виникнення пожеж, підвищення рівня безпеки обслуговуючого персоналу та пожежно-рятувальних підрозділів, а також на забезпечення надійної та безпечної експлуатації фотоелектричних систем у критичній інфраструктурі та житловому секторі.

Ключові слова: фотоелектричні системи, ВАРV, пожежна безпека, з'єднувачі постійного струму, фотоелектрика.

FIRE RISKS IN PHOTOVOLTAIC SYSTEMS AND WAYS TO MINIMIZE THEM

Introduction. Considering the current situation in Ukraine's energy sector, the demand for photovoltaic systems (PV systems) continues to grow. In particular, PV systems are increasingly being installed at critical infrastructure facilities, healthcare institutions [1], educational institutions [2], and multi-apartment residential buildings [3], to achieve energy independence and cost savings. Since these systems are mounted on existing buildings/structures, PV systems in this case do not replace conventional building materials but rather add additional combustible load. Overall, PV systems are divided into two categories [4]: BIPV and BAPV. The principle of BIPV is that conventional building materials (metal roofing, glazing, façade cladding materials, etc.) are replaced with photovoltaic components. BAPV refers to PV systems mounted on existing buildings/structures. This category of systems is more widespread due to economic considerations, as it does not require major renovations.

Purpose: The purpose of this study is to conduct a comprehensive analysis of fire hazard factors associated with the operation of MC-4 direct current connectors in BAPV systems, to identify the main defects during installation and operation that lead to fire incidents, and to develop recommendations for risk minimization through improved design solutions and maintenance practices.

Methods: To achieve the study's purpose, experimental tests of MC-4 direct-current connectors under current overload conditions were conducted, and methods for data analysis and comparison were applied.

Results: Experimental investigations demonstrated that MC-4 direct current connectors of domestic production reached significant temperatures during testing, which, in the absence of fire safety distances, may cause fire. The analysis of fire causes in PV systems in Ukraine and abroad confirmed that connectors are a key issue in PV fire safety, underscoring the relevance of this research. Preventive measures aimed at preventing fires in BAPV systems and minimizing fire risks has been proposed.

Conclusions: The analysis of fire statistics in Ukraine for 2023–2025 showed that all recorded incidents were related specifically to BAPV systems, while no fires occurred in BIPV systems. This indicates the wider use of rooftop and façade systems, which create additional combustible loads for existing buildings and complicate the process of fire suppression.

The conducted analysis and experimental studies confirmed that MC-4 direct current connectors are among the most fire-hazardous elements of BAPV photovoltaic systems. They most often become the source of short circuits and current overloads, leading to the formation of electric arcs and thermal degradation of materials. The test results demonstrated that domestic samples of connectors are significantly inferior to foreign analogues in terms of overload resistance. Under conditions of sudden changes in current, they quickly lost structural integrity, accompanied by intensive smoke formation and increased temperatures. The proposed preventive measures are aimed at reducing the likelihood of fire occurrence, increasing the safety of maintenance personnel and fire and rescue units, as well as ensuring reliable and safe operation of photovoltaic systems in critical infrastructure and the residential sector.

Key words: photovoltaic systems, BAPV, fire safety, direct current connectors, photovoltaics.

Вступ. Враховуючи відкриті дані медіа, в період 2023–2025 року на території України, зафіксовано 18 випадків пожеж, пов'язаних із експлуатацією фотоелектричних систем. Аналіз показує, що значна частина даних (6 випадків, 33 %) – це не встановлені причини виникнення пожежі. До конкретних технічних факторів належать короткі замикання (далі – КЗ) – 6 випадків (33 %), а також порушення умов зберігання 1 випадок (6 %) та неналежне технічне обслуговування (далі – ТО) 1 випадок (6 %). Природні та зовнішні чинники (механічні пошкодження) також мають вагомий вплив: зафіксовано випадок ураження блискавкою (1 випадок, 6 %) та виникнення пожежі внаслідок воєнних дій (2 випадки, 11 %).

За типом систем в абсолютній більшості переважають BAPV системи – 18 випадків (100%), тоді як на BIPV не виникало пожеж (0 %). Це свідчить про ширше використання дахових та наземних систем, що монтуються на існуючих будинках/спорудах, порівняно з інтегрованими рішеннями.

Географічний розподіл випадків (Рисунок 2) демонструє концентрацію у Закарпатській області (3 випадки), Одеській області (3 випадки) та Львівській області (2 випадки). Поодинокі випадки зафіксовано у Київській, Івано-Франківській, Рівненській, Тернопільській, Дніпропетровській, Вінницькій, Запорізькій та Хмельницькій областях.



Рис. 1. Наслідки пожежі у Львівській області на ФЕС, де причиною стало ураження блискавки, м. Радехів, Львівська область, липень 2025



Рис. 2. Розподіл кількості пожеж, що виникли в областях України впродовж 2023–2025 років

Аналіз останніх досягнень та публікацій. Авторами [5] виконано розробку дерева несправностей ФЕС та проведено кількісний аналіз пожеж пов'язаних із ФЕС. Встановлено основні компоненти, що складають найбільший ризик пожежної небезпеки, серед яких – з'єднувачі (17 %). Розраховано частоту виникнення пожеж, яка складає: 29 пожеж на 1 ГВт встановленої потужності на рік. У роботі [6] представлено аналіз пожеж у Великій Британії де виробами-ініціаторами у більшості стали інвертори та з'єднувачі, ними запропоновано мінімальні протипожежні відстані між компонентами ФЕС та поряд розташованими протипожежними перешкодами, конструкціями, а також обґрунтовано запровадження протипожежних відстаней по периметру будівлі/споруди з метою забезпечення безпеки особового складу пожежно-рятувальних підрозділів.

У роботі [7] проаналізовано температурні характеристики дугового замикання постійного струму, що у більшості випадків виникає в місцях з'єднання фотоелектричних модулів (ФЕМ). Роз'яснено час наростання температури дуги постійного струму та характерного розподілу довжини дуги. Дане дослідження підтверджує потребу розробки чітких протипожежних відстаней між фотоелектричними рядками (стрінгами), та іншими поряд розташованими

конструкціями, протипожежними перешкодами, тощо.

Необхідність зменшення ризику виникнення пожеж та своєчасного технічного обслуговування у своїй роботі окреслюють автори [8]. Ними досліджено явище гарячої точки, старіння панелей та визначено, що саме вони складають найбільший ризик. Умови за яких виникають дані явища: щільність пилу навколо масиву, температуру навколишнього середовища та матеріальну структуру панелей. Запропоновано превентивні заходи для зменшення ризику виникнення пожеж, зокрема розділено їх на два напрями: проектування, якісний монтаж ФЕМ та технічний огляд.

Відповідно до [6], [9], [10] значний відсоток із проаналізованих причин виникнення пожеж закордоном припадає на вимикачі постійного струму та з'єднувачі постійного струму. Не менш вразливими є інвертори та фотоелектричні кабелі. ФЕМ, як виріб – ініціатор, практично не складає ризику за умов якісного монтажу, проте через ефект «гарячих точок» та виробничих дефектів можуть спричинити пожежу.

З точки зору пожежної безпеки – способи розміщення на фасадах та дахах складають неабиякі ризики, оскільки значним чином залежать від оздоблення зовнішніх стін будинків та споруд, що у випадку пожежі, разом з компонентами ФЕС збільшать пожежну навантагу та складатимуть додаткові складнощі під час гасіння.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих результатів. Принципова схема ФЕС та її компоненти зображена на рисунку 3. Проаналізована нами інформація, щодо виникнення пожеж на території України впродовж останніх трьох років дала змогу окреслити основні рекомендації щодо безпечної експлуатації ФЕС. Враховуючи статистику, більшість пожеж (58 %) виникало на даховій ФЕС. Де найпоширенішими стали випадки неякісного монтажу, короткі замикання в місцях з'єднання з'єднувачів фотоелектричних, несправність інвертора та відсутність обслуговування.

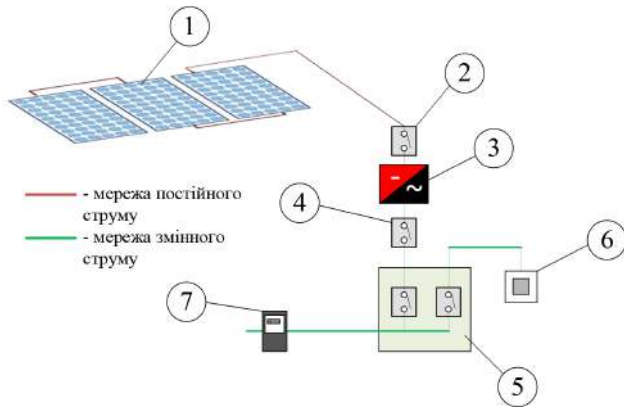


Рис. 3. Принципова будова ФЕС:
 1 – фотоелектричний рядок; 2 – вимикач постійного струму; 3 – інвертор; 4 – вимикач змінного струму; 5 – електричний щит; 6 – споживач; 7 – лічильник

Як можна побачити, кожен компонент ФЕС – важливий, та становить ризик пожежної небезпеки. Для визначення найкращих практик щодо попередження виникнення пожеж на ФЕС нами проведено дослідження [12], де у провіднику створювали струмові навантаження фіксували: час, значення температури та сили струму з'єднувача та провідника. Значення напруги та сили струму фіксувалися за допомогою вольтметра та амперметра, ввімкнених у схему лабораторної установки, а температури – за допомогою тепловізора та термопари. Гарячий спай термопари фіксували на поверхні контактної з'єднувача для отримання значень температури зовнішньої шару з'єднувача (ізоляції).

Щоб побачити наскільки впливає провідник на з'єднувач до швидкознімної гніздової частини приєднали провідник, який позиціонується на ринку, як кабель для з'єднань фотоелектричних систем (виконаний з лудженої міді, в якості ізоляції – полівінілхлорид), а до швидкознімної штекерної частини приєднали провідник вітчизняного зразка.

В ході проведення досліду, поступово навантажували з'єднувальну ділянку за допомогою лабораторної установки. Змінювали параметри навантаження ділянки з'єднання частин фотоелектричної системи за допомогою автотрансформатора TV1. Експериментальні значення сили струму, обумовлені допустимими струмами для провідників певного перерізу, згідно з ПУЕ [11] табл. 1.3.4. імітувалось 2, 3 та 4-кратне струмове перевантаження.

Розміщення лабораторної установки, зразків, вимірювальної техніки та засобів фото-відео фіксації зображена на рисунку 4.

Результати випробувань зображено на рисунку 5. Протягом 35 хв автотрансформатором



Рис. 4. Розміщення установки, зразків, вимірювальної техніки та засобів фото- і відеофіксації

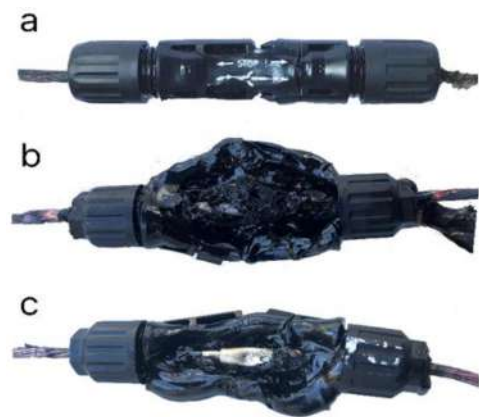


Рис. 5. Фотоелектричні з'єднувачі типу MC-4 після проведеного випробування: а – зразок закордонного виробництва, б, с – вітчизняного

створювалися струмові перевантаження, (сила струму, що протікала провідником та з'єднувачем, становила 110 А, на 35 хв змінили параметри на автотрансформаторі. Станом на 36 хв сила струму становила 160 А) [13].

З кожним наступним кроком зміни параметрів перенавантаження: температура та зовнішні ознаки цілісності з'єднувача та провідників змінювались.

Фотоелектричні з'єднувачі вітчизняного виробництва у порівнянні зі зразками закордонного – набагато гірше показали себе в умовах струмового перенавантаження. З'єднувачі вітчизняного зразка при стрімкій зміні сили струму втратили свою конструктивну цілісність через термічну деструкцію, при цьому інтенсивне димотворення збільшувалось зі зміною параметрів температури на з'єднувачі. Порівняльна характеристика з'єднувачів за результатами проведених досліджень наведена на рисунку 6.

Провівши дослідження визначили слабкі місця фотоелектричної системи саме на провідниках та



Рис. 6. Порівняльна характеристика з'єднувачів за результатами проведення дослідів

з'єднаннях [14]. Використання несертифікованого обладнання призведе до катастрофічних наслідків не лише суб'єкта господарювання, а й для оперативно-рятувальних служб цивільного захисту, що прибувають на ліквідацію надзвичайної ситуації.

Отже, як можемо побачити з'єднувачі закордонного зразка здатні витримувати струмове перенавантаження та при цьому не утворювати високих температур. Перспективним є також подальше дослідження вогнестійкості та інших показників пожежної безпеки фотоелектричних систем.

Враховуючи дані дослідження, з метою запобігання виникнення пожеж та подій на об'єктах ФЕС, а також попередження нещасних випадків (травмування, загибель), як власників так і пожежних-рятувальників проектування та експлуатація ФЕС повинно здійснюватися з урахуванням виконання базових вимог, що включають такі аспекти [10]:

- уникнення перешкод для роботи системи димовидалення, недопущення блокування світлових ліхтарів та ускладнення роботи природних систем відведення диму і тепла;
- запобігання поширенню пожежі від ФЕС на будівлю та/або між її окремими протипожежними відсіками;
- забезпечення застосування фотоелектричних кабелів, розподільчих щитів та з'єднувачів постійного струму на поширення пожежі на даху чи фасаді будівлі/споруди, де встановлено систему;
- забезпечення безпеки обслуговуючого персоналу;
- забезпечення безпеки пожежно-рятувальних підрозділів.

Висновок. Запобігання пожежам на ФЕС що прикріпленні до фасаду будівлі/споруди неможливе без методу систематичного огляду всіх компонентів, оскільки, пошкоджений ФЕМ може генерувати потужності, які вказані виробником в технічному паспорті без суттєвих змін. Цей метод ефективний при виявленні тріщин, що можуть виникати, як від механічного так і від природного впливів,

«гарячих точок», а також при моніторингу стану з'єднань на ФЕМ або масиві. При огляді рекомендовано застосовувати тепловізори, як ручні, так і в складі безпілотних літальних апаратів, які за умови великих площ, зможуть швидше обстежити територію та визначити місця з підвищеним ризиком.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Укрінформ. У Харкові на даху дитячої лікарні встановили сонячну електростанцію. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-regions/3887129-uharkovi-na-dahu-ditacoi-likarni-vstanovili-sonacnu-elektrostanciu.html>
2. Energy Actua. 100 Solar Schools. URL: <https://www.energyactua.com/uk/100solarschools>
3. Київська міська державна адміністрація. Київська багатоповерхівка встановила сонячні панелі на даху, що дозволяють забезпечити роботу тепловентилятора в умовах відключення електроенергії. URL: https://kyivcity.gov.ua/news/kivska_bagatopoverkhivka_vstanovila_sonyachni_paneli_na_dakhu_scho_dozvoliyayut_zabezpechiti_robotu_teplopunktu_v_umovakh_vidklyuchennya_elektroenergi_foto/
4. Allianz Global Corporate & Specialty. Fire Hazards of Photovoltaic (PV) Systems = ARC Tech Talk. Vol. 8. Allianz Risk Consulting. Munich: Allianz Global Corporate & Specialty SE, 2019. 25 p. URL: <https://commercial.allianz.com/content/dam/onemarketing/commercial/commercial/pdfs-risk-advisory/ARC-Tech-Talk-Vol-8-Fire-Hazards-PV-Systems-EN.pdf>
5. Nizam Ong N. A. F. M., Sadiq M. A., Md Said M. S., Jomaas G., Mohd Tohir M. Z., Kristensen J. S. Fault tree analysis of fires on rooftops with photovoltaic systems. *Journal of Building Engineering*. 2022. Vol. 46. 103752. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103752>
6. ZAG. Fire safety guideline for building applied photovoltaic systems on flat roofs : guideline. May 2024. 32 p. URL: <https://www.frissbe.eu> (дата звернення: 04.05.2026).
7. Armijo K. M., Johnson J., Hibbs M., Fresquez A. Characterizing fire danger from low-power photovoltaic

arc-faults. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2014. SAND2014-4593C. URL: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1146568>

8. Li Y., Wang Y., Zhang Y., Zhao Y. Research on fire safety of photovoltaic power generation systems. In: *Proceedings of the 2019 IEEE 3rd International Electrical and Energy Conference (CIEEC)*. Beijing: IEEE, 2019. P. 1887–1892.

9. Nizam Ong N. A. F. M., Sadiq M. A., Md Said M. S., Jomaas G., Mohd Tohir M. Z., Kristensen J. S. Fault tree analysis of fires on rooftops with photovoltaic systems. *Journal of Building Engineering*. 2022. Vol. 46. P. 103752.

10. Mazziotti L., Cancelliere P., Paduano G., Setti P., Sassi S. Fire risk related to the use of PV systems in building facades. *MATEC Web of Conferences*. 2016. Vol. 46. 05001. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20164605001>

11. Міненерговугілля України. Правила улаштування електроустановок. Київ : Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, 2017. Наказ від 21.07.2017 № 476.

12. Соляник Н. Ю., Назаровець О. Б., Рудик Ю. І. Випробування з'єднувачів фотоелектричних систем за термічними показниками пожежної безпеки. *Пожежна безпека*. 2023. № 43. С. 144–152.

13. Соляник Н., Дідич В., Назаровець О. Аналіз пожежної небезпеки прикріплених до фасаду будівлі фотоелектричних систем (BAPV). У: *Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення* : матеріали міжнар. наук.-практ. конф. Львів : ЛДУБЖД, 2024. С. 72–73.

14. Соляник Н., Назаровець О. Пожежна небезпека фотоелектричних з'єднувачів типу MC-4 під час струмових перенавантажень. У: *Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності* : зб. наук. праць XIX міжнар. наук.-практ. конф. Львів : ЛДУБЖД, 2024. С. 249–251.

15. Uma J., Muniraj C., Sathya N. Diagnosis of photovoltaic (PV) panel defects based on testing and evaluation of thermal image. *Journal of Testing and Evaluation*. 2019. Vol. 47, No. 6. P. 4249–4262.

16. Wang Y., Zhang Y., Li Y., Zhao Y. Fire risk assessment of photovoltaic power generation systems. *Renewable Energy*. 2020. Vol. 145. P. 2290–2300.

REFERENCES

1. Ukrinform. (2024). U Kharkovi na dakhu dytiachoi likarni vstanovyly soniachnu elektrostansiiu [A solar power plant was installed on the roof of a children's hospital in Kharkiv]. Retrieved from: <https://www.ukrinform.ua/rubric-regions/3887129-u-harkovi-na-dahu-ditacoi-likarni-vstanovili-sonacnu-elektrostanciu.html> [in Ukrainian].

2. Energy Actua. (n.d.). 100 Solar Schools. Retrieved from: <https://www.energyactua.com/uk/100solarschools>

3. Kyiv City State Administration. (n.d.). Kyivska bahatopoverkhivka vstanovyly soniachni paneli

na dakhu, shcho dozvoliaut zabezpechyty robotu teplopunktu v umovakh vidkliuchennia elektroenerhii [A Kyiv apartment building installed solar panels enabling operation of a heating point during power outages]. Retrieved from: https://kyivcity.gov.ua/news/kivska_bahatopoverkhivka_vstanovila_son_yachni_paneli_na_dakhu_scho_dozvolyayut_zabezpechiti_robotu_teplopunktu_v_umovakh_vidkliuchennya_elektroenergi_foto/ [in Ukrainian].

4. Allianz Global Corporate & Specialty. (2019). *Fire hazards of photovoltaic (PV) systems: ARC Tech Talk Vol. 8*. Allianz Risk Consulting. Retrieved from: <https://commercial.allianz.com/content/dam/onemarketing/commercial/commercial/pdfs-risk-advisory/ARC-Tech-Talk-Vol-8-Fire-Hazards-PV-Systems-EN.pdf>

5. Nizam Ong, N. A. F. M., Sadiq, M. A., Md Said, M. S., Jomaas, G., Mohd Tohir, M. Z., & Kristensen, J. S. (2022). Fault tree analysis of fires on rooftops with photovoltaic systems. *Journal of Building Engineering*, 46, 103752. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103752>

6. ZAG. (2024). *Fire safety guideline for building applied photovoltaic systems on flat roofs*. <https://www.frissbe.eu>

7. Armijo, K. M., Johnson, J., Hibbs, M., & Fresquez, A. (2014). Characterizing fire danger from low-power photovoltaic arc-faults. Sandia National Laboratories (SAND2014-4593C). <https://www.osti.gov/servlets/purl/1146568>

8. Li, Y., Wang, Y., Zhang, Y., & Zhao, Y. (2019). Research on fire safety of photovoltaic power generation systems. In *Proceedings of the 2019 IEEE 3rd International Electrical and Energy Conference (CIEEC)* (pp. 1887–1892). IEEE.

9. Nizam Ong, N. A. F. M., Sadiq, M. A., Md Said, M. S., Jomaas, G., Mohd Tohir, M. Z., & Kristensen, J. S. (2022). Fault tree analysis of fires on rooftops with photovoltaic systems. *Journal of Building Engineering*, 46, 103752.

10. Mazziotti, L., Cancelliere, P., Paduano, G., Setti, P., & Sassi, S. (2016). Fire risk related to the use of PV systems in building facades. *MATEC Web of Conferences*, 46, 05001. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20164605001>

11. Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine. (2017). *Rules for electrical installations (PUE)*. Kyiv, Ukraine. Order No. 476 (21.07.2017). [in Ukrainian].

12. Solianyk, N. Yu., Nazarovets, O. B., & Rudyk, Yu. I. (2023). Vyprovuvannia z'iednuvachiv fotoelektrychnykh system za termichnymy pokaznykamy pozhezhnoi bezpeky [Testing of photovoltaic connectors by thermal fire safety indicators]. *Pozhezhna bezpeka*, (43), 144–152. [in Ukrainian].

13. Solianyk, N., Didych, V., & Nazarovets, O. (2024). Analiz pozhezhnoi nebezpeky prykriplenykh do fasadu budivli fotoelektrychnykh system (BAPV) [Fire hazard analysis of building-applied PV systems]. In *Actual problems of fire safety and emergency prevention* (pp. 72–73). Lviv : LSU of Life Safety. [in Ukrainian].

14. Solianyк, N., & Nazarovets, O. (2024). Pozhezhna nebezpeka fotoelektrychnykh z'iednuvachiv typu MC-4 pid chas strumovykh perevantazhen [Fire hazard of MC-4 connectors under overload conditions]. In *Problems and prospects of life safety system development* (pp. 249–251). Lviv : LSU of Life Safety. [in Ukrainian].

15. Uma, J., Muniraj, C., & Sathya, N. (2019). Diagnosis of photovoltaic (PV) panel defects based on testing and evaluation of thermal image. *Journal of Testing and Evaluation*, 47(6), 4249–4262.

16. Wang, Y., Zhang, Y., Li, Y., & Zhao, Y. (2020). Fire risk assessment of photovoltaic power generation systems. *Renewable Energy*, 145, 2290–2300.

© Н. Ю. Соляник, О. Б. Назаровець

Оглядова стаття

Дата першого надходження статті до видання: 20.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 29.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.48.2026.13>

Ю. О. Терлецький, О. Ю. Пазен

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

✉ yurii.terletskyi@swisskrono.com

ДИНАМІКА ЗМІНИ ТЕМПЕРАТУРИ ПОБЛИЗУ ОСЕРЕДКУ ПОЖЕЖІ В СКЛАДСЬКОМУ ПРИМІЩЕННІ

Проблема. Пожежі у складських приміщеннях, зокрема на деревообробних підприємствах, характеризуються складною динамікою розвитку та значною інтенсивністю поширення. Використання відомих температурних режимів не дозволяє точно оцінити реальні умови нагрівання матеріалів, що ускладнює прогнозування розвитку пожежі та оцінку її небезпеки.

Мета. Метою роботи є дослідження температурного режиму пожежі в складському приміщенні з палетами OSB/3 плит, а також визначення залежності температури від часу та відстані до осередку пожежі для подальшого прогнозування її розвитку.

Методи дослідження. У роботі застосовано метод комп'ютерного моделювання з використанням програмного забезпечення Fire Dynamics Simulator (FDS). Проведено чисельне моделювання процесів теплопередачі в складському приміщенні, з урахуванням геометричних параметрів об'єкта та розташування температурних датчиків. Для аналізу отриманих даних використано методи апроксимації та побудови математичних залежностей зміни температури в часі.

Основні результати. Встановлено, що реальний температурний режим пожежі істотно відрізняється від відомих температурних режимів пожежі, зокрема на початкових етапах розвитку. Отримано часові залежності зміни температури поблизу осередку пожежі та запропоновано параметричні залежності для їх опису в різних часових інтервалах. Отримані результати дозволяють більш точно прогнозувати розвиток пожежі в складських приміщеннях.

Висновки. Комп'ютерне моделювання за допомогою FDS дозволяє визначити температурний режим пожежі поблизу осередку пожежі в складському приміщенні. Змодельований температурний режим поблизу осередку пожежі суттєво відрізняється від стандартного температурного режиму пожежі. Фактичні температури значно нижчі на початкових етапах розвитку пожежі.

Температура навколо осередку пожежі залежить від відстані, що дозволяє в подальшому визначити вплив джерела горіння на сусідні палети. Запропоновані математичні залежності (для різних інтервалів часу) дають можливість більш точно описувати динаміку нагрівання матеріалу в умовах пожежі та можуть бути використані для прогнозування поширення пожежі та визначення часу досягнення температур займання (самозаймання) сусідніх матеріалів у складських приміщеннях.

Ключові слова: пожежна безпека, OSB, температурний режим пожежі, комп'ютерне моделювання, складські приміщення.

Yu. O. Terletskyi, O. Yu. Pazen

Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine

DYNAMICS OF TEMPERATURE CHANGES NEAR THE FIRE CENTER IN A WAREHOUSE

Problem. Fires in warehouses, in particular at woodworking enterprises, are characterized by complex development dynamics and significant spread intensity. The use of known temperature regimes does not allow for an accurate assessment of the real conditions of heating of materials, which complicates the prediction of fire development and assessment of its danger.

Purpose. The purpose of the work is to study the temperature regime of a fire in a warehouse with pallets of OSB/3 boards, as well as to determine the dependence of temperature on time and distance to the fire center for further prediction of its development.

Research methods. The work uses the method of computer modeling using the Fire Dynamics Simulator (FDS) software. Numerical modeling of heat transfer processes in a warehouse was carried out, taking into account the geometric parameters of the object and the location of temperature sensors. Methods of approximation and construction of mathematical dependences of temperature changes over time were used to analyze the obtained data.

Main results. It was established that the real temperature regime of a fire differs significantly from the known temperature regimes of a fire, in particular at the initial stages of development. The time dependences of the temperature change near the fire source were obtained and parametric dependences were proposed for their description in different time intervals. The obtained results will allow for a more accurate prediction of the development of a fire in warehouses.

Conclusions. Computer modeling using FDS allows for the determination of the temperature regime of a fire near the fire source in a warehouse. The simulated temperature regime near the fire source differs significantly from the standard temperature regime of a fire. Actual temperatures are much lower at the initial stages of fire development.

The temperature around the fire source depends on the distance, which allows for the further determination of the impact of the combustion source on neighboring pallets. The proposed mathematical dependences (for different time intervals) make it possible to more accurately describe the dynamics of material heating under fire conditions and can be used to predict the spread of fire and determine the time of reaching the ignition (spontaneous ignition) temperatures of neighboring materials in warehouses.

Key words: fire safety, OSB, fire temperature regime, computer modeling, warehouses.

Постановка проблеми. Основна вимога щодо забезпечення пожежної безпеки стосується зведення до мінімуму можливості виникнення пожежі під час будівництва, експлуатації та ліквідації будівель і споруд. Чинниками, що негативно впливають на забезпечення пожежної безпеки об'єктів, є теплові, механічні, хімічні, біологічні та електромагнітні впливи. Тепловий вплив складається із випромінювання, конвекції і теплопровідності. Рівень теплового впливу залежно від часу визначається стадією розвитку пожежі, яку можна змоделювати розрахунковим методом або випробуванням [1].

Основним поняттям для якого проводиться моделювання пожежі в приміщенні є «межа вогнестійкості». До 2022 року в Україні дане визначення було обмежене лише стандартним температурним режимом пожежі. З набранням чинності [1], поняття температурного режиму пожежі розширилось до «додаткового», «альтернативного» температурних режимів.

Частково проблема сценарію розвитку пожежі була вирішена з прийняттям ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2010, яким передбачалось, що для кожного проектного сценарію пожежі необхідно оцінити температурний режим пожежі у протипожежному відсіку, яким визначено номінальні температурні режими пожеж. Основними номінальними температурними режими пожеж визначено стандартний температурний режим, температурний режим зовнішньої пожежі та вуглеводневий температурний режим [2].

Вищеописані температурні режими пожеж можуть бути застосованими лише для оцінювання вогнестійкості елементів будівельних

конструкцій, однак їх не доцільно використовувати при дослідженні процесів поширення пожежі в різноманітних приміщеннях.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питанням моделювання температурних режимів пожеж висвітлено в роботах багатьох науковців. У своїй праці [3] автори аналізують зміну температури на різних висотах у приміщенні під час пожежі. Також, використовують математичні залежності для розрахунку тепломасообміну з оточуючим середовищем, що дозволяє точніше прогнозувати небезпеку для людей у житлових та громадських спорудах.

Дослідженні, спрямовані на запобігання пожежам в підземних комерційних приміщеннях чисельно змодельовано за допомогою програмного забезпечення PyroSim в роботі [4]. Сценарії моделювання пожежі розділені відповідно до різних зон пожежі шляхом аналізу температури, концентрації чадного газу (CO) та видимості в шарі диму всередині будівлі.

За допомогою інструментів обчислювальної гідродинаміки (CFD) авторами [5] було розроблено комплексну базу даних, яка в першу чергу зосереджена на основних сценаріях пожежі. Загалом було створено базу даних із 300 сценаріїв пожеж, змодельованих через CFD, і використані для навчання нейронних мереж. ІІІ навчився прогнозувати температуру та видимість у реальному часі з точністю понад 90 %. Використання ІІІ для швидкого прогнозування динаміки пожежі на складі також запропоновано авторами [6] для прогнозування напрямку поширення вогню.

Дослідження [7] присвячене специфіці горіння товарів, розміщених на багатоярусних стелажах. За допомогою програми FDS автори змоделювали вертикальне поширення полум'я та швидкість вивільнення тепла. У роботі встановлено, що за відсутності міжстележних екранів пожежа досягає покрівлі складу за лічені хвилини. Особлива увага приділена критичному часу для спрацювання автоматичних систем пожежогасіння.

Автори у роботі [8] застосовували FDS-моделювання для виявлення вплив конструктивних параметрів фасадних протипожежних карнизів на ефективність запобігання поширенню пожежі вертикальними будівельними конструкціями у висотних будівлях. Для цього використовувалася комп'ютерна система Pyrosim, яка є оболонкою для програми FDS і використовує чисельні алгоритми розв'язку повної системи диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса для визначення температури та інших небезпечних факторів під час пожежі. За допомогою FDS моделювання побудовано типову модель висотної будівлі, відтворено пожежне навантаження всередині приміщень та обґрунтовано критерії руйнування зовнішніх світлових прорізів (вікон), як невід'ємного чинника поширенню пожежі зовнішніми вертикальними будівельними конструкціями висотних будівель.

Виходячи з аналізу останніх публікацій використання FDS (Fire Dynamics Simulator) для прогнозування динаміки розвитку пожежі є популярним серед науковців.

Мета дослідження. У даній статті розглядається процес розвитку пожежі палети OSB/3 плити та температурні показники на відстані від 20 до 80 см з використанням комп'ютерної програми FDS. Дане дослідження дасть змогу оцінити вплив осередку пожежі на її поширення під час складування та визначити залежність температури від відстані.

Виклад основного матеріалу. Для математичного моделювання температурного режиму поблизу осередку пожежі під час горіння палети OSB/3 плити використано комп'ютерну програму FDS. Для моделювання обрано склад з геометричними розмірами 42 на 120 м та висотою до покрівлі від 6,97 м до 8,97 м (двосхила похила покрівля). Прийнято що одна з палет OSB/3 є осередком пожежі. Схематичне зображення моделі в середовищі FDS наведено на рис. 1

Для визначення температурних показників на відстані 20, від осередку пожежі розташовано чотири датчики температури з різних сторін палети OSB/3 плит (осередку пожежі) відповідно. Висота розташування датчиків становить 3 м (половина висоти складування). Дані комп'ютерного моделювання наведено на рис. 2.

Результати моделювання показують, що реальний температурний режим пожежі відрізнитиметься від стандартизованих. Так, наприклад на 300 с температура навколо палети становитиме в районі від 150 до 200 °С, тоді як стандартний температурний режим даватиме температуру 576 °С. Зведений графік порівняння стандартного температурного режиму пожежі та середньої температури на відстані 20 см від осередку пожежі наведено на рис. 3.

Для апроксимації даних та отримання середньої температури навколо осередку пожежі було використано програмне середовище Microsoft Exel та за показниками температури накладено лінію Тренда. Для середньої температури приймався узагальнений показник чотирьох датчиків температури, які розташовані навколо осередку пожежі на відстані 20 см. Доступні параметри лінії Тренда дають низький коефіцієнт детермінації (найкращий показник коефіцієнта детермінації R^2 для полінома 6 степеня становить 0,4105), тому для відображення зміни середньої температури навколо палети OSB/3 плити прийнято рішення ввести параметричну

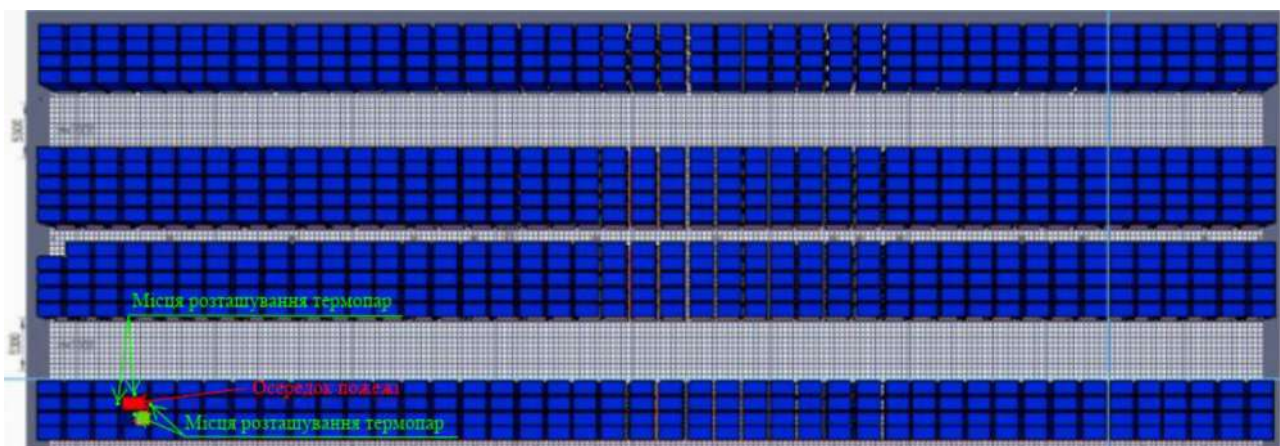


Рис. 1. Схематичне зображення моделі складування OSB/3 плит

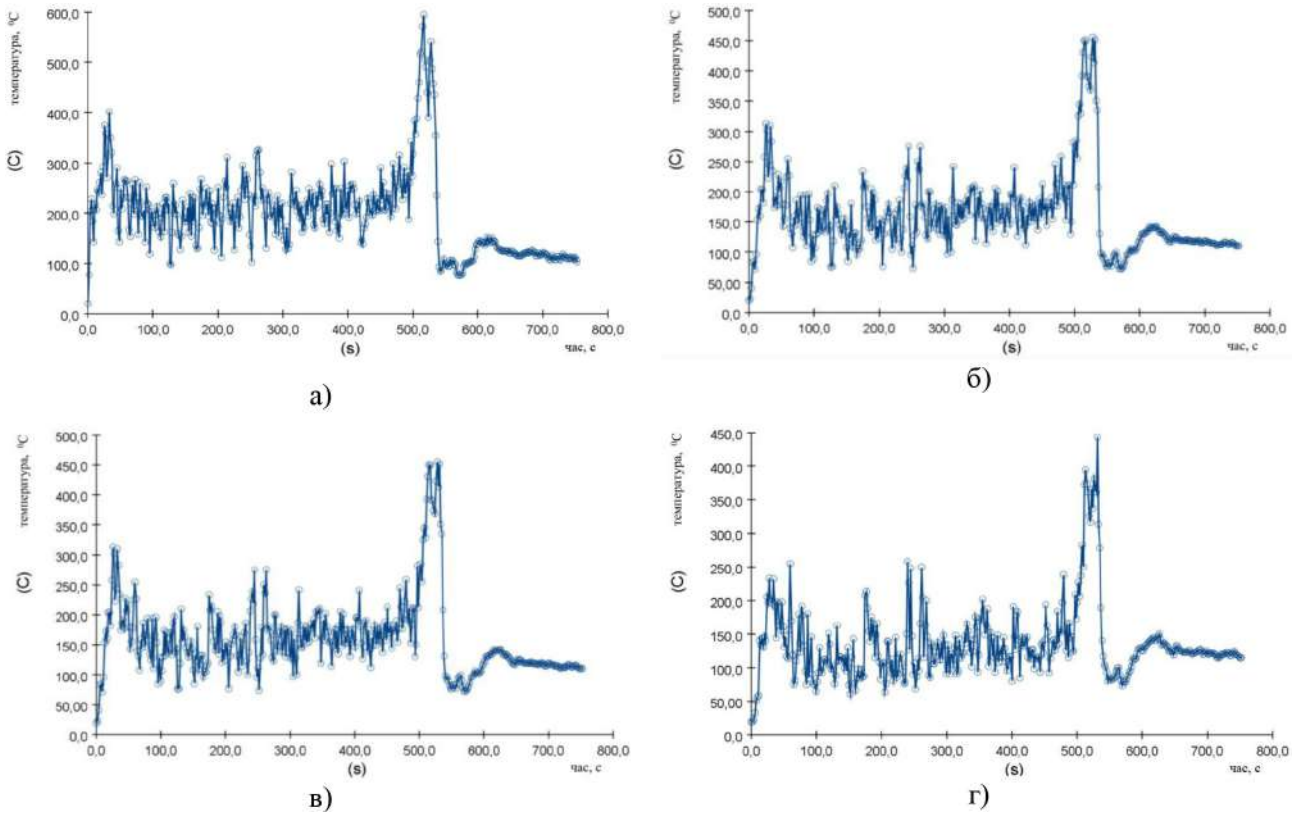


Рис. 2. Часові залежності зміни температури на відстані 20 см від осередку пожежі: а) датчик розташований внизу відносно осередку пожежі; б) датчик розташований ліворуч відносно осередку пожежі; в) датчик розташований праворуч відносно осередку пожежі; г) датчик розташований вгорі відносно осередку пожежі

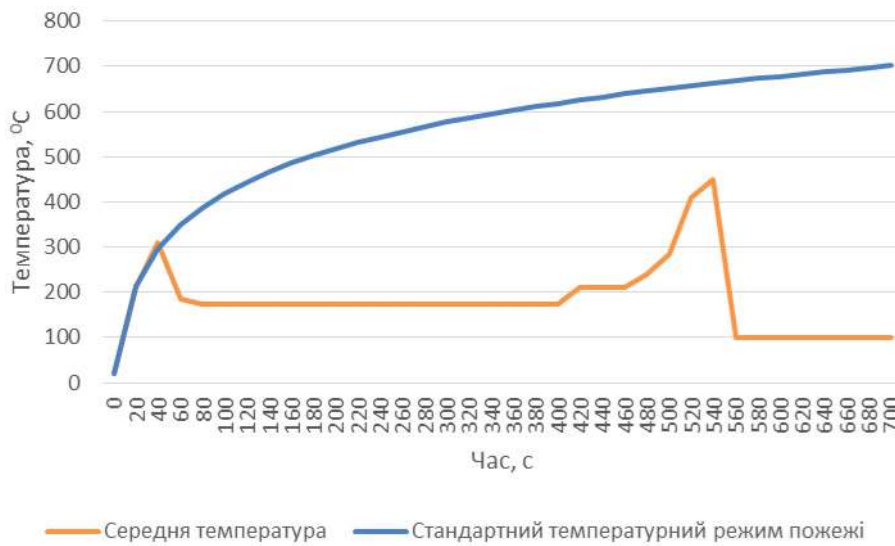


Рис. 3. Співставлення стандартного температурного режиму пожежі та середньої температури навколо палети OSB/3 плити

складову, тобто описати процес зміни температури для окремих проміжків часу.

Для часу до 60 с температура описується рівнянням

$$t = -22,5\tau^3 + 90\tau^2 + 77,5\tau - 125, \quad R^2 = 1 \quad (1)$$

в діапазоні 60–540 с

$$t = 2E-05\tau^6 - 0,001\tau^5 + 0,0225\tau^4 - 0,3012\tau^3 + 2,3945\tau^2 - 10,093\tau + 190,92, \quad R^2 = 0,9757 \quad (2)$$

і для діапазону 540–700 с

$$t = 0,1296\tau^6 - 4,3376\tau^5 + 58,134\tau^4 - 397,25\tau^3 + 1450,4\tau^2 - 2663,1\tau + 2005,6, \quad R^2 = 0,9895. \quad (3)$$

Вищенаведені результати дозволять більш точно прогнозувати нагрівання OSB\3 плит в умовах пожежі, визначати час нагрівання сусідніх палет до температур займання (самозаймання) [9], що в свою чергу дозволить точніше прогнозувати поширення пожежі в приміщеннях складування OSB\3 плит.

Висновок. Комп'ютерне моделювання за допомогою FDS дозволяє визначити температурний режим пожежі поблизу осередка пожежі в складському приміщенні. Змодельований температурний режим поблизу осередку пожежі суттєво відрізняється від стандартного температурного режиму пожежі. Фактичні температури значно нижчі на початкових етапах розвитку пожежі.

Температура навколо осередку пожежі залежить від відстані, що дозволяє в подальшому визначити вплив джерела горіння на сусідні палети. Запропоновані математичні залежності (для різних інтервалів часу) дають можливість більш точно описувати динаміку нагрівання матеріалу в умовах пожежі та можуть бути використані для прогнозування поширення пожежі та визначення часу досягнення температур займання (самозаймання) сусідніх матеріалів у складських приміщеннях.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ДБН В.1.2-7:2021. Основні вимоги до будівель і споруд. Пожежна безпека.. На заміну ДБН В.1.2-7:2008 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Основні вимоги до будівель і споруд. Пожежна безпека ; чинний від 01.09.2022. Київ : Державне підприємство «Укрархбудінформ», 2022. 17 с.
2. ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2010. Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-2. Загальні дії. Дії на конструкції під час пожежі ; чинний від 01.07.2013. Київ : Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2012. 171 с.
3. Гуліда Е. М., Ренкас А. А. Моделювання пожежі в приміщеннях житлових та громадських споруд з урахуванням тепломасообміну з оточуючим середовищем. *Пожежна безпека: теорія і практика*. 2012. № 11. С. 16–24.

4. Numerical Simulation of Fire in Underground Commercial Street / Yao X. et al. *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2022. Vol. 2022. Art. 4699471. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/4699471>

5. Data-Driven Prediction Methods for Real-Time Indoor Fire Scenario Reconstruction / J. Kim et al. *Fire*. 2023. Vol. 6, iss. 10. Art. 401. DOI: <https://doi.org/10.3390/fire6100401>

6. Deep Learning-based Fire Evolution Prediction in Logistics Warehouses / Wu X. et al. *Advanced Engineering Informatics*. 2022. Vol. 53. Art. 101669. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109897>

7. Wang J., Wang H., Zhou X. Numerical Simulation of Fire Development and Sprinkler Response in High-Rack Storage. *Fire*. 2022. Vol. 5, iss. 4. Art. 112. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.11-1170

8. Яковчук Р. С., Балло Я. В., Кузик А. Д., Кігітін О. І., Ковальчук В. М. FDS моделювання ефективності протипожежних карнизів на запобігання поширенню пожежі фасадними конструкціями висотних будівель. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*, 2021. № 23, С. 39–45. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20784643.23.2021.06>

9. Терлецький Ю. О., Пазен О. Ю., Тацій Р. М., Лин А. С. Дослідження впливу параметрів пожежі на нагрівання орієнтовано-стружкових плит. *Збірник наукових праць Пожежна безпека*. 2025. № 46. С. 126–131. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.46.2025.13>

REFERENCES

1. DBN V.1.2-7:2021. (2022). *Osnovni vymohy do budivel i sporud. Pozhezhna bezpeka* [Basic requirements for buildings and structures. Fire safety]. Kyiv : Ukrarkhbuildinform. [in Ukrainian].
2. DSTU-N B EN 1991-1-2:2010. (2012). *Yevrokod 1. Dii na konstruktzii. Chastyna 1–2. Zahalni dii. Dii na konstruktzii pid chas pozhezhi* [Eurocode 1: Actions on structures. Part 1–2. General actions. Actions on structures exposed to fire]. Kyiv: Ministry for Regional Development and Construction of Ukraine. [in Ukrainian].
3. Hulida, E. M., & Renkas, A. A. (2012). Modeliuvannia pozhezhi v prymyshchenniakh zhytlovykh ta hromadskykh sporud z urakhuvanniam teplomasoobminu z otouchuiuchym seredovyshchem [Fire modeling in residential and public buildings considering heat and mass exchange]. *Pozhezhna bezpeka: teoriia i praktyka*, (11), 16–24. [in Ukrainian].
4. Yao, X., et al. (2022). Numerical simulation of fire in underground commercial street. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022, 4699471. <https://doi.org/10.1155/2022/4699471>
5. Kim, J., et al. (2023). Data-driven prediction methods for real-time indoor fire scenario reconstruction. *Fire*, 6(10), 401. <https://doi.org/10.3390/fire6100401>

6. Wu, X., et al. (2022). Deep learning-based fire evolution prediction in logistics warehouses. *Advanced Engineering Informatics*, 53, 101669. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.109897>
7. Wang, J., Wang, H., & Zhou, X. (2022). Numerical simulation of fire development and sprinkler response in high-rack storage. *Fire*, 5(4), 112. <https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.11-1170>
8. Yakovchuk, R. S., Ballo, Ya. V., Kuzyk, A. D., Kyhityn, O. I., & Kovalchuk, V. M. (2021). FDS modeling of fire-prevention cornices efficiency for preventing fire spread along facade structures of high-rise buildings. *Visnyk Lvivskoho derzhavnoho universytetu bezpeky zhyttiediialnosti*, (23), 39–45. <https://doi.org/10.32447/20784643.23.2021.06>
9. Terletsykyi, Yu. O., Pazen, O. Yu., Tatsii, R. M., & Lyn, A. S. (2025). Investigation of fire parameters influence on heating of oriented strand boards. *Pozhezhna bezpeka*, (46), 126–131. <https://doi.org/10.32447/20786662.46.2025.13>

© Ю. О. Терлецький, О. Ю. Пазен

Науково-методична стаття

Дата першого надходження статті до видання: 15.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.48.2026.14>

В. А. Цопа¹, С. І. Чеберячко², Ю. І. Чеберячко², О. В. Дерюгін², Г. І. Туровська³

¹ Міжнародний інститут менеджменту, м. Київ, Україна

² Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»,
м. Дніпро, Україна

³ Національний університет водного господарства та природокористування,
м. Рівне, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4811-3712> – В. А. Цопа

<https://orcid.org/0000-0003-3281-7157> – С. І. Чеберячко

<https://orcid.org/0000-0001-7307-1553> – Ю. І. Чеберячко

<https://orcid.org/0000-0002-2456-7664> – О. В. Дерюгін

<https://orcid.org/0000-0002-1492-9123> – Г. І. Туровська



h.i.turovska@nuwm.edu.ua

РОЗРОБКА ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ РИЗИКАМИ КОМПЛЕКСНИХ НЕБЕЗПЕЧНИХ ПОДІЙ (ІНЦИДЕНТІВ) НА ПРИКЛАДІ НЕБЕЗПЕКИ ФЕЄРВЕРКІВ ДЛЯ ПОВОЄННОЇ БЕЗПЕКОВОЇ МОДЕЛІ УКРАЇНИ

Проблема. Джерелом значних ризиків, пов'язаних з пожежами, травмами, вибухами та токсичними викидами є феєрверки, особливо в закритих приміщеннях або при масових заходах. Виникає необхідність у побудові моделі керування ризиками комплексних небезпечних подій (інцидентів) для забезпечення систематичної ідентифікації, оцінювання та зменшення ризиків, а отже і загибелі та травмування людей.

Мета. Розробити модель керування ризиками комплексних небезпечних подій (інцидентів) на основі статистичного аналізу нещасних випадків та інцидентів, пов'язаних із використанням, зберіганням і виробництвом феєрверків від впливу різних небезпечних чинників.

Методи дослідження. Для вирішення поставленої задачі був використаний метод морфологічного аналізу, який заснований на підборі можливих рішень з оцінки технологічності моделей керування ризиками (за наявності системи критеріїв) і прийняття раціонального рішення щодо особливостей документування оцінки ризику з використанням інтегрованих підходів, які дозволили конкретизувати елементи, що формують локальні топологічні і метричні простори.

Основні результати. Розроблена модель керування ризиками комплексних небезпечних подій (інцидентів) є багаторівневою та ескалаційною, що відрізняє її від класичних однорівневих моделей (наприклад, стандартної Bow-Tie), оскільки враховує ланцюг небезпечних подій, які характеризуються зростанням тяжкості наслідків. Розроблена модель інтегрує кількісну оцінку ризиків від комплексних небезпечних подій з урахуванням зростання ймовірності їх настання від впливу небезпечних чинників, що дозволяє переходити від реактивного до проактивного підходу запобігання небезпечним подіям. Проведений аналіз інцидентів з феєрверками за останні 50 років виявив ключову закономірність, що полягає у зростанні рівня ризику настання небезпечної події (пожежі) в місцях масового скупчення людей через використання горючих матеріалів для оздоблення приміщень, переповненість місць відпочинку, накопичення токсичного диму та недостатню кількість евакуаційних виходів. Запропоновано розрізняти два типи ризиків комплексних небезпечних подій (інцидентів) з феєрверками – це «місце виробництва/зберігання», де відбувається детонація маси піротехніки та «місце використання/споживання», де відбуваються пожежі в закритих приміщеннях.

Наукова новизна полягає у розробці процесу керування ризиками комплексних небезпечних подій (інцидентів) в системах управління безпекою при виробництві, зберіганні та використанні феєрверків, в якому, на відміну від існуючих, проводиться оцінювання ризиків від низки послідовних ланцюгових небезпечних подій.

Практична цінність полягає у розробці рекомендацій для регуляторів ринку щодо посилення ліцензування, заборони використання піротехніки, забезпечення умов для оцінки ризиків настання комплексних небезпечних подій.

сних небезпечних подій (інцидентів), створення глобальної бази даних причин настання небезпечних подій з феєрверками.

Ключові слова: ризик, безпека, небезпечна подія, пожежа, вибух, керування ризиком феєрверків, комплексна небезпечна подія.

V. A. Tsopa¹, S. I. Cheberichko², Yu. I. Cheberichko², O. V. Deriuhin², H. I. Turovska³

¹ International Management Institute, Kyiv, Ukraine

² Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

³ National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine

DEVELOPMENT OF A RISK MANAGEMENT PROCESS FOR COMPLEX HAZARDOUS INCIDENTS TOWARD A POST-WAR SECURITY MODEL OF UKRAINE: CASE STUDY OF FIREWORK HAZARDS

Problem statement. Fireworks are a source of significant risks associated with fires, injuries, explosions, and toxic emissions, especially in enclosed spaces or during mass events. The need to build a risk management model for complex hazardous events (incidents) arises to ensure systematic identification, assessment, and mitigation of risks and the consequent reduction in fatalities and injuries.

Purpose. Development of a risk management model for complex hazardous events (incidents) based on statistical analysis of accidents and incidents associated with production, storage and use of fireworks from the influence of various hazardous factors.

Methods. Morphological analysis was used to solve this task. This method is based on selection of possible solutions for assessing the technological feasibility of risk management models (if a system of criteria is available) and making a rational decision regarding the features of documenting the risk assessment using integrated approaches, which made it possible to specify elements that form topological and metric spaces with local properties.

Results. The developed risk management model for complex hazardous events (incidents) is multilevel and escalating, which differs it from classical single-level models (for example, standard Bow-Tie), since it considers a chain of hazardous events, which are characterized by the increasing severity of the consequences. The developed model integrates quantification of complex hazardous event risks, considering increase the probability of their occurrence from the influence of hazardous factors, which allows for moving from a reactive to a proactive approach to hazardous event prevention. The analysis of firework related incidents over the last 50 years identified a key regularity, which lies in the increasing risk level of a hazardous event (fire) in crowded places. This occurs as a result of using combustible materials to decorate spaces, overcrowding of holiday destinations, accumulating toxic smoke, and insufficient number of emergency exits. It is proposed to distinguish between two types of risk for complex hazardous firework events (incidents). They are as follows: “place of production and storage”, where the detonation of a pyrotechnic mass occurs; “place of use and consumption”, where fires occurs in enclosed spaces.

The scientific novelty lies in developing process of risk management for complex hazardous events (incidents) within safety management systems in production, storage and use of fireworks. In the proposed process, unlike the existing processes, the risk assessment is carried out from a consecutive chain of hazardous events.

The practical value lies in developing recommendations for regulatory bodies regarding strengthening licensing, banning the use of pyrotechnics, ensuring conditions for risk assessment of complex hazardous events (incidents), and creation of a global database of hazardous firework event causes.

Key words: risk, hazard, hazardous event, fire, explosion, firework risk management, complex hazardous event.

Постановка проблеми. Виробництво феєрверків бере початок у Стародавньому Китаї, відтоді як один кухар випадково змішав сіль, сірку та вугілля. Пізніше феєрверки стали невід’ємною частиною китайської культури, супроводжуючи різноманітні святкування: Свято Весни, Свято середини осені та інші [1]. З Китаю феєрверки поширилися до Європи, де швидко знайшли своє застосування на урочистих заходах та військових парадах. З 18-го століття і до сьогодні

вони стали невід’ємною частиною розваг та мистецтва [2]. Зараз існує величезна кількість фабрик з виробництва феєрверків як для особистого, так і професійного використання. При цьому їх виготовлення, зберігання й використання регламентується низкою суворих стандартів безпеки (наприклад, EN 15947, APA 87-1A, NFPA 1124, NFPA 1126 «Code for the Manufacture, Transportation, Storage, and Retail Sales of Fireworks and Pyrotechnic Articles», «Standard

for the Use of Pyrotechnics Before a Proximate Audience», Технічний регламент піротехнічних виробів, затверджений Постановою Кабінету Міністрів України № 839 від 03.08.2011 та інші). Однак в світі за останні 50 років загинуло біля **3 тис.** осіб через інциденти, пов'язані з феєрверками (табл. 1).

Оскільки феєрверки та піротехніка є джерелом значних ризиків, пов'язаних з пожежами, травмами, вибухами та токсичними викидами [2, 3], особливо в закритих приміщеннях або при масових заходах, виникає необхідність у побудові моделі керування ризиками. Це дозволить забезпечити систематичну ідентифікацію, оцінювання та зменшення ризиків, а отже і загибелі та травмування людей. Розроблена модель насамперед створить умови переходу від реактивного підходу (реагування на інциденти) до проактивного (запобігання небезпечним подіям чи надзвичайним ситуаціям).

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У роботі [2] авторами проведено експерименти в камері вибуху (вимірювання надлишкового тиску від піротехніки 1.4 G), пожежні тести в складі (27 м³, до 50 кг NEC) та тести щодо швидкості гасіння пожежі. Авторами виявлено закономірності між падінням тиску від вибуху та щільністю заряду. Показано, що у замкнутому просторі навіть 1.4 G викликає масовий вибух із пожежею. На жаль, в роботі не було виявлено впливу геометрії замкнутих просторів на розвиток руйнування.

У роботі [3] авторами виконаний теоретичний розрахунок викидів (CO₂/CO) під час застосування піротехніки в закритому приміщенні та проведено оцінювання ризиків травмування людей методом HAZOP, виходячи з ідентифікації небезпек на основі перхлоратів/чорного порошу. Автори зазначали, що додавання нітроцелюлози зменшує CO₂ на 42 %, але збільшує CO. Разом з тим при оцінці ризиків небезпечну подію не розглядали як комплексну, що не дозволило виявити послідовність взаємодії низки небезпечних чинників, які збільшують ризик.

У роботі [5] авторами проаналізовано вибухи феєрверків за 20 років. Виявлено, що основною причиною небезпечних подій є людські помилки. При цьому ключем помилок слугували психологічні проблеми у працівників, а також організаційні невідповідності щодо зберігання піротехніки. На жаль, автори обмежились дослідженням причин людської помилки.

У роботі [6] авторами виконаний глибокий огляд літератури з аварійних ситуацій з піротехнікою. Були визначені відповідні рейтинги експозиції/ризиків на основі ймовірності та тяжкості наслідків. На жаль, автори також зосередились на людських помилках без доказів кореневих причин; дані спостережні/звітні (можливо неповні); моделі адаптовані з інших секторів; короткострокові ефекти повітря вивчені недостатньо.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Загалом, наукові статті фокусуються на експериментальних дослідженнях (пожежі/вибухи), симуляціях (евакуація/ML) та оглядах (інциденти). Моделі – від класичних (HAZOP, RASH) до сучасних (ML, Monte Carlo). Недоліки спільні: обмежена узагальненість (регіон/лабораторія), брак повномасштабних тестів, невизначеність даних. Це підкреслює потребу в глобальних базах інцидентів та інтегрованих моделях.

Мета статті – розробити модель керування ризиками комплексних небезпечних подій (інцидентів) на основі статистичного аналізу нещасних випадків та інцидентів, пов'язаних із використанням, зберіганням та виробництвом феєрверків від впливу різних небезпечних чинників.

Методи дослідження. Для вирішення поставленої задачі був використаний метод морфологічного аналізу [7], який передбачає систематичний підбір і комбінування можливих рішень для декомпозиції складних систем. Метод застосовувався для оцінки технологічності моделей керування ризиками феєрверків на основі чіткої системи критеріїв: ефективності ідентифікації ризиків (оцінка за кількістю виявлених комбінацій) та визначення тяжкості наслідків (оцінка в спеціалізованому

Таблиця 1

Аналіз піротехнічних інцидентів за кількістю загиблих, об'єктами та десятиліттями [4]

Десятиліття	Розважальні заклади та громадські заходи	Зберігання та торгівля	Виробництво	Інше	Загальна кількість загиблих
1970–1979	708	0	6	0	714
1980–1989	0	62	55	7	124
1990–1999	0	98	260	0	358
2000–2009	597	291	56	0	944
2010–2019	418	75	89	0	582
2020–дотепер	175	37	23	16	251
РАЗОМ	1898	563	489	23	2973

програмному забезпеченні). Це дозволило прийняти раціональне рішення щодо особливостей оцінки ризиків феєрверків, інтегруючи підходи з ризик-менеджменту, і конкретизувати елементи, що формують локальні топологічні (структурні взаємозв'язки подій) та метричні (кількісні оцінки ймовірностей) простори зазначеного підходу. Процес реалізації методу включав три кроки. Перший – ідентифікація ключових параметрів ризиків (наприклад, небезпечні події: НП1 – несанкціоноване загоряння, НП2 – детонаційний вибух, НП3 – пожежа). Другий – створення морфологічних декомпозицій для задачі оцінки ризику, де виявлено 4 основні комбінації розвитку подій (наприклад, «загоряння + відсутність евакуації, масова пожежа» або «вибух на виробництві – руйнування інфраструктури»), на основі аналізу інцидентів. Третій – заповнення морфологічних ящиків (матриць) варіантами комбінацій, наприклад, 3 × 4 матриця, де рядки – етапи подій (НП1-НП3), стовпці – небезпечні чинники ризику, а клітинки – ймовірності (від 0,1 до 0,9), розраховані за статистичними даними з літератури [8]. Для мінімізації суб'єктивності оцінки проводилися за допомогою експертної панелі (5 фахівців з безпеки піротехніки), з використанням методу Делфі для узгодження (коефіцієнт узгодженості Кронбаха > 0,8), а також статистичної валідації на тестовому наборі з 10 інцидентів. Аналіз отриманих варіантів дозволив виявити комбінації розвитку подій після нещасного випадку, які традиційні підходи (наприклад, однорівнева оцінка) ігнорують, такі як часова залежність небезпечних чинників. Виявлені ознаки були представлені у формі таблиць-морфологічних ящиків, що полегшило візуалізацію моделі керування ризиками та швидшу навігацію в різноманітні поняття і факторів. У результаті системного аналізу згенеровано нову багаторівневу модель, яка дозволяє по-новому підійти до оцінки ризику, систематизуючи небезпечні чинники залежно від часу виникнення події та забезпечуючи відтворюваність через задокументовані дані.

Виклад основного матеріалу. Для розуміння масштабів трагедій, пов'язаних із феєрверками, першочерговим завданням є систематизація інцидентів за їх найтяжчим наслідком – кількістю людських життів. Наведений нижче аналіз інцидентів (табл. 2) дозволяє ранжувати всі задокументовані випадки за кількістю смертельних жертв, від найбільшої до найменшої.

Звідси всі інциденти можна розділити на групи за масштабом загиблих:

- **Катастрофічні (50+ смертей) інциденти**, ця група включає події з масовою загибеллю людей, які часто стають національними трагедіями.

- **Великі (10–49 смертей) інциденти**, це інциденти зі значними наслідками, часто пов'язані з промисловими об'єктами або великими скупченнями людей.

- **Локальні (<10 смертей) інциденти**, це інциденти мени масштабні, але більш численні випадки, що становлять постійну загрозу.

Детальний розгляд найсмертоносніших інцидентів виявляє критично важливу закономірність. Всупереч поширеній думці, найбільша кількість жертв (понад 100 загиблих) рідко є прямим наслідком вибуху на виробництві. Натомість, ці трагедії є результатом пожеж у місцях масового скупчення людей: нічних клубах (Kiss, Кроманьон, Station), громадських залах (Сіньцзян), торгових центрах (Меса-Редонда) та на весіллях (Каракош). У цих сценаріях феєрверк виступає не як основна руйнівна сила, а як ініціатор займання. Сценарій настання інциденту зміщується від детонації великої маси піротехніки до швидкого поширення вогню легкозаймистими матеріалами оздоблення в замкненому просторі, що супроводжується панікою та отруєнням токсичним димом. Крім того, спостерігається значна диспропорція між кількістю загиблих та поранених залежно від типу інциденту. Пожежі в нічних клубах генерують величезну кількість постраждалих. Наприклад, у клубі «Кроманьон» на 194 загиблих припадає понад 1492 поранених (співвідношення ~1:7.7), а в клубі Kiss – 242 загиблих на 630 поранених (~1:2.6). На противагу цьому, вибух на заводі Aerlex в Оклахомі призвів до 21 смерті та лише 5 поранень (~1:0.2). Це свідчить про різні механізми ураження: вибухи на виробництві мають високу летальність в епіцентрі, але обмежену зону ураження, тоді як пожежі в закритих приміщеннях призводять до масового отруєння димом та опіків серед великої кількості людей, які не гинуть миттєво. Це створює колосальне навантаження на служби з надзвичайних ситуацій (пожежників) та системи охорони здоров'я.

Особливої уваги заслуговує небезпечний чинник локацій – концентрації інцидентів у конкретних локаціях. Яскравим прикладом є місто Тультепек у Мексиці, яке фігурує в даних тричі за короткий проміжок часу: вибух на ринку Сан-Пабліто у 2016 році (42 загиблих) [11], а також два окремі вибухи на складах у 2018 році (7 та 24 загиблих) [12]. Така повторюваність вказує на те, що це не випадкові події, а прояв глибоко вкоріненої системної проблеми в системі управління ОЗіБП. Ризик у таких місцях тісно пов'язаний з місцевою економікою та культурою, де виробництво та продаж піротехніки є основою добробуту цілих громад. Це перетворює проблему з суто

Рейтинг інцидентів, пов'язаних з феєрверками, за кількістю смертельних випадків [9, 10]

Рейтинг	Кількість смертей	Кількість поранених	Дата	Небезпечна подія	Країна	Тип об'єкта (стандартизований)
1	694	161	18.02.1977	Пожежа на фермі 61-го полку Сінцзяну	Китай	Розважальні заклади та громадські заходи
2	291	134	29.12.2001	Пожежа в Меса-Редонді	Перу	Зберігання та торгівля
3	242	630	27.01.2013	Пожежа в нічному клубі Kiss	Бразилія	Розважальні заклади та громадські заходи
4	194	1492+	30.12.2004	Пожежа в нічному клубі «Кроманьон»	Аргентина	Розважальні заклади та громадські заходи
6	134	405	31.01.1996	Вибух у Шаояні 1996 року	Китай	Виробництво
7	111	350+	10.04.2016	Пожежа в храмі Путгаля	Індія	Місця поклоніння
8	107	82	26.09.2023	Весільна пожежа в Каракіші 2023 року	Ірак	Розважальні заклади та громадські заходи
9	100	230	20.02.2003	Пожежа в нічному клубі Station	Сполучені Штати Америки	Розважальні заклади та громадські заходи
10	100	–	23.06.1958	Вибух на стенді для феєрверків	Бразилія	Зберігання та торгівля
11	67	222	01.01.2009	Пожежа в клубі «Сантіка»	Таїланд	Розважальні заклади та громадські заходи
12	64	146	30.10.2015	Пожежа в нічному клубі Colectiv	Румунія	Розважальні заклади та громадські заходи
13	63	348	26.09.1999	Катастрофа з феєрверком у Селаї	Мексика	Зберігання та торгівля
14	62	155+	16.03.2025	Пожежа в нічному клубі Кочані	Північна Македонія	Розважальні заклади та громадські заходи
15	62	83	12.12.1988	Катастрофа з феєрверком у Мехіко	Мексика	Зберігання та торгівля

організаційної, тобто дотримання стандартів безпеки, на комплексну соціально-економічну, де будь-які регуляторні заходи стикаються з економічними інтересами населення [13].

Аналіз місць, де стаються інциденти, дозволяє виявити фундаментальну дихотомію ризиків, пов'язаних із феєрверками (табл. 3). Всі інциденти можна розділити на дві принципово різні категорії, що вимагають абсолютно різних підходів до запобігання.

Таблиця 3

Аналіз інцидентів за типом об'єкта

Тип об'єкта, де стався інцидент	Загальна кількість загиблих	Частка від загальної кількості (%)
Розважальні заклади та громадські заходи	1898	62,1
Зберігання та торгівля	563	19,6
Виробництво	489	18,0
Інше	23	0,8
РАЗОМ	2973	100,0

Катастрофи в точці інциденту на виробництві та зберіганні включають інциденти, що стаються

на об'єктах, де піротехніка виробляється або зберігається у великих кількостях: заводи, фабрики, склади. Прикладами є вибух на заводі Aerlex у США (21 загиблий) [14], катастрофа на складі в Енсхеде, Нідерланди (23 загиблих) [11] та вибух на заводі в Шаояні, Китай (134 загиблих) [15]. Основним механізмом ризику є детонація значної маси вибухових речовин. Це призводить до потужної вибухової хвилі, розльоту уламків і масштабних руйнувань. Головна небезпека спрямована на персонал підприємства та прилеглі території. Запобігання таким катастрофам лежить у площині суворого дотримання технологій виробництва, належних умов зберігання, правильного зонування та розташування небезпечних об'єктів на безпечній відстані від житлових районів. Розважальні заклади та громадські заходи мають найбільший вклад в загибелі людей (рис. 1). Аналіз численних пожеж у нічних клубах – Station (США, 100 загиблих), [16], «Кроманьон» (Аргентина, 194 загиблих) [16, 17], Kiss (Бразилія, 242 загиблих) [18], Colectiv (Румунія, 64 загиблих) [19, 20] – виявляє глобальний, повторюваний сценарій. Це не низка унікальних нещасних випадків, а системний збій в системі управління безпекою, що

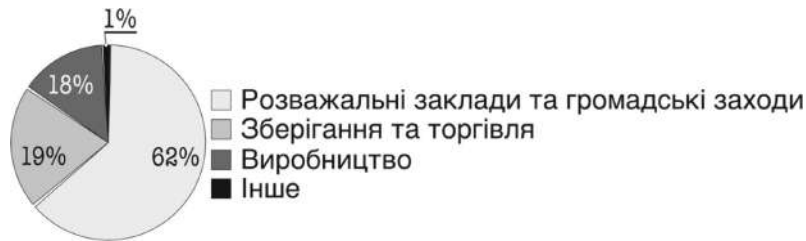


Рис. 1. Розподіл загальної кількості смертей за типом

відтворюється в різних країнах з трагічною регулярністю.

Сценарій практично ідентичний:

1. **Використання сценічної піротехніки** (часто «холодних фонтанів», які насправді не є холодними) у закритому приміщенні.

2. **Займання легкозаймистих декоративних або звукоізоляційних матеріалів** (пінопласт, тканина, пластик) на стелі чи стінах.

3. **Швидке поширення вогню та виділення надзвичайно токсичного диму**, який є основною причиною смерті.

4. **Паніка та тиснява** серед великої кількості людей, що посилюється темрявою та відключенням електроенергії.

5. **Недостатня кількість, блокування або неправильне маркування аварійних виходів**, що перетворює приміщення на смертельну пастку.

Визначена послідовність настільки стала, що її можна розглядати як ризик «Місце інциденту». Повторюваність свідчить про провал у засвоєнні уроків попередніх трагедій на глобальному рівні та нездатності регуляторів і власників закладів

в одній країні вчитися на помилках, зроблених в іншій.

Інциденти, подібні до пожежі в Меса-Редонді в Перу (291 загиблих) та вибуху на ринку Сан-Пабліто в Мексиці (42 загиблих) [15], ілюструють інший тип ризику «Кінцевого продавця». Ризик створюється через неконтрольоване зберігання та продаж великої кількості піротехніки у безпосередній близькості до скупчення людей. Це створює умови для ланцюгової реакції, де займання одного невеликого лотка може призвести до масових вибухів і пожежі, що охоплює всю територію торговельного майданчика.

Фундаментальне розрізнення між ризиками «Місце інциденту» та «Кінцевого продавця» є ключовим для розуміння проблеми безпеки з продажу феєрверків. Змішувати їх в одну категорію «інцидентів з феєрверками» буде помилкою, яка перешкоджає розробці результативних і дієвих заходів безпеки, оскільки вони вимагають абсолютно різних регуляторних підходів. Проведений аналіз дозволяє сформулювати модель керування ризиками феєрверків (рис. 2), особливістю якої є багаторівневність.

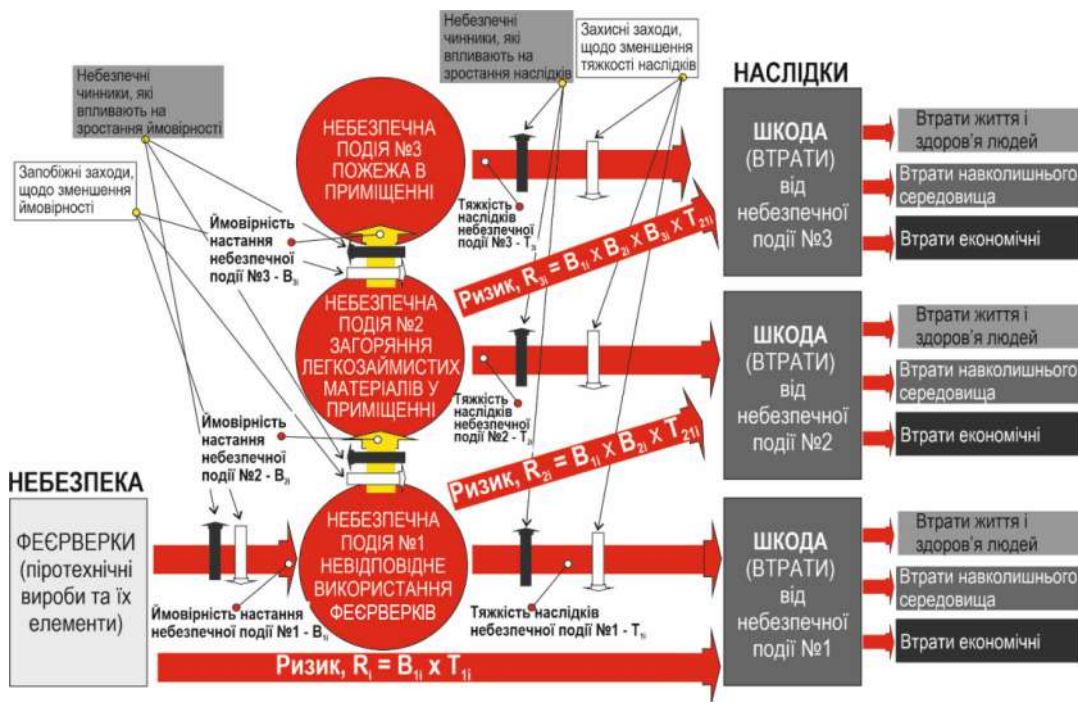


Рис. 2. Модель керування ризиками феєрверків

Виходячи із заданої ймовірності настання кожної небезпечної події: невідповідне використання піротехніки (НП1), загоряння легкозаймистих матеріалів у приміщенні (НП2), пожежа в приміщенні (НП3), – ризик розраховуємо за формулою:

$$\text{Ризик (НП}_n) = B_1 \cdot T_1 + B_1 \cdot B_2 \cdot T_2 + \dots + B_1 \cdot B_2 \cdot \dots \cdot B_n \cdot T_n, \quad (1)$$

де $НП_n$ – небезпечна подія n-ої послідовності;

B_1, B_2, \dots, B_n – ймовірність настання $НП_1, НП_2, \dots, НП_n$; B_1, B_2, \dots, B_n ;

T_n – тяжкість наслідків від настання небезпечних подій $НП_1, НП_2, \dots, НП_n$.

Для документування ризику комплексних небезпечних подій (інцидентів) від настання небезпечних подій – j від i -тої небезпеки пропонується використовувати табл. 4.

На ймовірність настання кожної небезпечної події впливає низка небезпечних чинників, які сприятимуть прояву наступного рівня розвитку комплексної небезпечної події. Виникає задача із їх ідентифікації та розробки запобіжних заходів для недопущення найгіршого розвитку небезпечної ситуації. На відміну від класичної однорівневої моделі керування ризиками, розроблена модель вказує чітко виражену послідовну (ланцюжкову) структуру, що відображає реальну фізичну послідовність розвитку небезпечних подій при використанні феєрверків у приміщенні. Замість однієї узагальненої ймовірності «виникнення пожежі від феєрверків» модель розбиває процес на три чітко визначені етапи, де кожна наступна подія можлива лише за умови реалізації попередньої: невідповідне використання (виготовлення), загоряння легкозаймистих матеріалів, розвиток повноцінної пожежі (вибух). Класична модель, зазвичай, працює з однією сумарною ймовірністю події (ризик пожежі), тоді як розроблена

модель використовує умовні ймовірності, що задаються саме за умови, що попередня подія вже сталася. Це краще описує реальну механіку надзвичайної ситуації.

Розглянемо приклад *вибуху піротехніки на фабриці «PT Ransa Viaan Cahyadi» у місті Тангеранг (Індонезія), що сталось 26 жовтня 2017 року* [15]. Проведене розслідування встановило основну причину: зварювальні роботи, що проводилися поруч із великою кількістю порошу. Разом з тим, було виявлено багато інших різних порушень, які призвели саме до найгіршого сценарію розвитку подій. *По-перше*, фабрика не мала системи оповіщення про виникнення пожежі, системи автоматичного пожежогасіння, при цьому додатковий (можна сказати евакуаційний) вихід був заблокований, що ускладнило порятунок. *По-друге*, виробництво феєрверків велося без відповідних дозволів, що є порушенням законодавства Індонезії. *По-третє*, ніхто не проводив ніяких інструктажів щодо безпечного виконання робіт. Можна припустити, що і для керівників середньої ланки – це була зайва втрата часу, бо більшість людей не слухали і не виконували правила безпеки.

Модель керування ризиками феєрверків, що пов'язує небезпеку (піротехнічні вироби) з появою комплексної небезпечної події – вибухом, пожежею і падінням даху та наслідками – загибелі 49 людей та 46 травмованих, наведена на рис. 3.

З відкритих джерел, відомо, що основними небезпечними чинниками, які збільшили ймовірність настання небезпечної події були: відсутність дозволу на виготовлення феєрверків, відсутність належних систем безпеки (ізоляція і віддалення, система вентиляції, захист від джерел відкритого вогню, використання обладнання

Таблиця 4

Результати документування ризику комплексних небезпечних подій (інцидентів) від настання небезпечних подій – j від i -тої небезпеки

Небезпека- i	Небезпечна подія $НП_{ij}$	Визначення			Оцінка ризику небезпечної події- j від небезпеки- i , $НП_j/П_j$	
		Тяжкість наслідків небезпечної події- j від небезпеки- i , T_{ij}	Ймовірність настання небезпечної події			Рівень ризику R_j від $НП_j$
i	$НП_{i1}$	T_{i1}	B_{i1}	B_{i1}	$B_{i1} \cdot T_{i1}$	$НП_1/П_1$
	$НП_{i2}$	T_{i2}	B_{i2}	$B_{i1} \cdot B_{i2}$		$НП_2/П_2$

	$НП_{ij}$	T_{ij}	B_{ij}	$B_{i1} \cdot B_{i2} \cdot \dots \cdot B_{ij}$	$B_{i1} \cdot B_{i2} \cdot \dots \cdot B_{ij} \cdot T_{ij}$	$НП_j/П_j$

	$НП_{im}$	T_{im}	B_{im}	$B_{i1} \cdot B_{i2} \cdot \dots \cdot B_{ij} \cdot \dots \cdot B_{im}$	$B_{i1} \cdot B_{i2} \cdot \dots \cdot B_{ij} \cdot \dots \cdot B_{im} \cdot T_{im}$	$НП_m/П_m$
	Ризик від небезпеки- i		$R_i = B_{i1} \cdot T_{i1} + B_{i1} \cdot B_{i2} \cdot T_{i2} + \dots + B_{i1} \cdot B_{i2} \cdot \dots \cdot B_{ij} \cdot T_{ij} + \dots + B_{i1} \cdot B_{i2} \cdot \dots \cdot B_{ij} \cdot \dots \cdot B_{im} \cdot T_{im}$		$НП_i/П_i$	

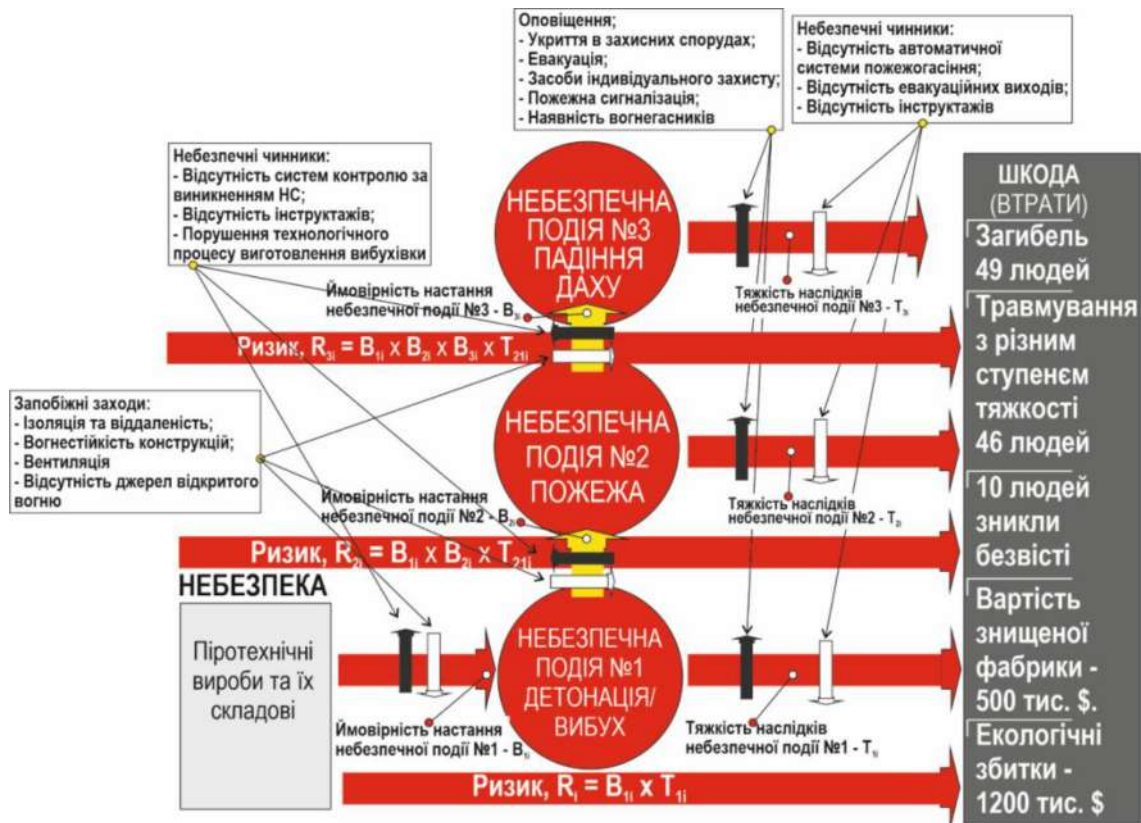


Рис. 3. Модель керування ризиками феєрверків на фабриці «PT Panca Buan Cahyadi»

у вибухобезпечному стані та інше), в тому числі пожежної (системи оповіщення, сигналізації, автоматичного пожежогасіння), відсутність евакуаційних виходів. Також не проводилось навчання на випадок аварійної ситуації та й загалом інструктажі – здебільшого формалізм. Фахівці визначають, що головною причиною була відсутність контролю за технологічним процесом виготовлення вибухівки, оскільки фабрика не мала права на проведення подібних робіт [12]. Крім того, було порушення законодавства щодо залучення неповнолітніх на небезпечних роботах. Навіть перелічених небезпечних чинників вже достатньо, щоб зрозуміти, що рівень ризику буде неприйнятним за будь-якою системою відліку (в табл. 5 наведено розрахунок ризику за матрицею 10 на 10, де ймовірність представлена за шкалою від 0 до 1, а тяжкість наслідків від 1 до 10; при цьому, коли від 5 і більше балів ризик є неприйнятним).

Розглянемо ще один трагічний випадок, який відбувся в нічному клубі «Kiss» (Санта-Марія, 27 січня 2013 року) [18]. У ніч пожежі в клубі проходила університетська вечірка, на якій були присутні переважно студенти віком від 18 до 30 років. На сцені виступав гурт Gurizada Fandangueira. Цей контекст пояснює демографічний склад жертв і святкову атмосферу, що сприяла використанню піротехніки. Ліцензована

місткість клубу становила менше 700 осіб, деякі джерела вказують на 691 особу. Однак у ніч трагедії, за різними оцінками, в закладі перебувало від 1000 до 2000 осіб. Повідомлялося, що адміністрація клубу дотримувалася принципу «чим більше людей усередині, тим краще». Це екстремальне переповнення стало однією з головних причин великої кількості загиблих, оскільки воно серйозно перешкождало будь-якій можливості впорядкованої евакуації, що важливо за даними [21] для підвищення безпеки натовпу. Інцидент в клубі «Kiss» не був наслідком однієї помилки, а результатом катастрофічного збігу численних, незалежних прихованих порушень (рис. 4). Протермінований дозвіл, незатверджені ремонтні роботи, використання легкозаймистої піни, непрацюючий вогнегасник, єдиний вихід і переповненість – усе це були попередні умови настання інциденту.

Піротехнічне шоу стало лише спусковим гачком першою небезпечною подією, який активував цей заздалегідь підготовлений механізм інциденту. Жодне із цих порушень саме по собі, ймовірно, не призвело би до 242 смертей. Однак їх поєднання створило систему з нульовою стійкістю до інциденту – надзвичайної ситуації. Регуляторний збій дозволив встановити небезпечний матеріал; операційний збій наповнив приміщення жертвами; технічні порушення унеможливили

Фрагмент ідентифікації та оцінювання ризику вибуху на фабриці фєсрверків

Небезпека-і	Небезпечна подія НП _{ij}	Тяжкість наслідків небезпечної події- <i>j</i> від небезпеки- <i>i</i> , T_{ij}	Визначення			Оцінка ризику небезпечної події- <i>j</i> від небезпеки- <i>i</i> , $НП_i/\Pi_j$
			Ймовірність настання небезпечної події	Рівень ризику R_{ij} від НП _j		
i	НП _{i1}	T_{i1}	B_{i1}	B_{i1}	$B_{i1} \cdot T_{i1}$	$НП_1/\Pi_1$
	НП _{i2}	T_{i2}	B_{i2}	$B_{i1} \cdot B_{i2}$		$НП_2/\Pi_2$

	НП _{ij}	T_{ij}	B_{ij}	$B_{i1} \cdot B_{i2} \cdot \dots \cdot B_{ij}$	$B_{i1} \cdot B_{i2} \cdot \dots \cdot B_{ij} \cdot T_{ij}$	$НП_2/\Pi_2$

	НП _{im}	T_{im}	B_{im}	$B_{i1} \cdot B_{i2} \cdot \dots \cdot B_{ij} \cdot \dots \cdot B_{im}$	$B_{i1} \cdot B_{i2} \cdot \dots \cdot B_{ij} \cdot \dots \cdot B_{im} \cdot T_{im}$	$НП_m/\Pi_m$
Ризик від небезпеки- <i>i</i>			$R_i = B_{i1} \cdot T + B_{i1} \cdot B_{i2} \cdot T_{i2} + \dots + B_{i1} \cdot B_{i2} \cdot \dots \cdot B_{ij} \cdot T_{ij} + \dots + B_{i1} \cdot B_{i2} \cdot \dots \cdot B_{ij} \cdot \dots \cdot B_{im} \cdot T_{im}$		$НП_i/\Pi_i$	

ранне гасіння чи попередження; а проектний збій (єдиний вихід) заблокував усіх усередині. Пожежа стала неминучим наслідком цього ідеально вибудованого ланцюга недбалості, тобто смертельного причинно-наслідкового ланцюга від небезпеки до втрат життя і здоров'я людей. **Перший небезпечний чинник** – легкозаймиста акустична піна. Стеля клубу була оздоблена пінополіуретаном для звукоізоляції. Цей матеріал при займанні швидко горить і виділяє густий, токсичний дим, що містить ціанід і чадний газ. Саме ця піна стала основним паливом, що дозволило вогню поширитися з дивовижною швидкістю. Клуб встановив цю нову підвісну стелю з легкозаймистим

оздобленням у листопаді 2012 року, не повідомивши про це владу. **Другий небезпечний чинник** – критичні невідповідності в системах пожежної безпеки закладу: шляхи евакуації. У клубі був лише один функціонуючий вихід для відвідувачів – вхідні двері. Хоча в пожежному сертифікаті було неправдиво зазначено про наявність двох аварійних виходів, насправді це було не так. Металеві бар'єри, що використовувалися для організації черги, додатково перекривали цей єдиний вихід. Крім того, системи пожежогасіння та виявлення були відсутні у закладі, як і аварійне освітлення, що посилювало паніку й дезорієнтацію. **Третій небезпечний чинник** – регуляторні

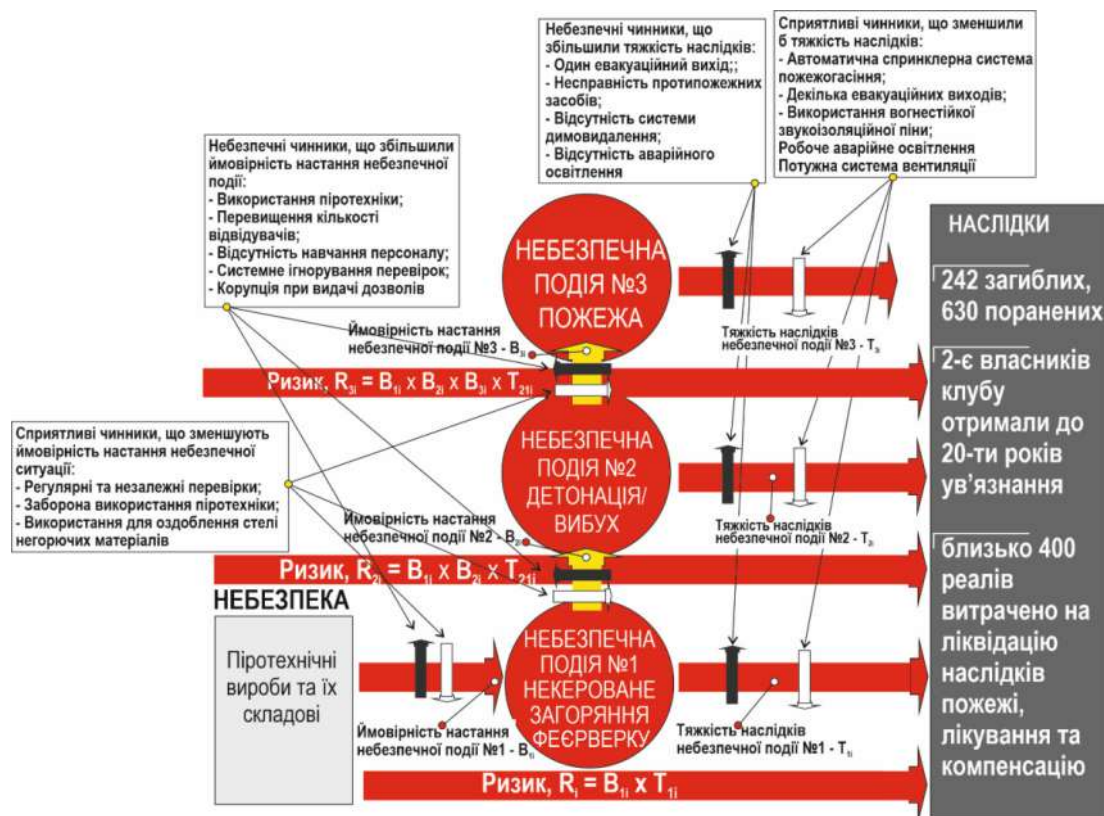


Рис. 4. Модель керування ризиками фєсрверків в нічному клубі «Kiss»

Фрагмент ідентифікації та оцінювання ризику в нічному клубі «Kiss»

Н	Небезпечна подія	Визначення			Рівень ризику R_{ij} від $НП_j$	Оцінка ризику
		Тяжкість наслідків НП	Ймовірність настання НП			
феєрверк	$НП_1$ Некероване використання піротехніки	$T_1 = 10$	$B_1 = 0,5$	$B1 = 0,5$	$R_1 = 0,5 \cdot 10 = 5,0$	НПн
	$НП_2$ Займання декоративних матеріалів	$T_2 = 10$	$B_2 = 1,0$	$B_{12} = 0,5 \cdot 1,0 = 0,5$	$R_{12} = 0,5 \cdot 1,0 \cdot 10 = 10$	НПз
	$НП_3$ пожежа	$T_3 = 10$	$B_3 = 1,0$	$B_{123} = 0,5 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 0,5$	$R_{123} = 0,5 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 10 = 10$	НПп
	Ризик від небезпеки – феєрверку			$R_\phi = R_1 + R_{12} + R_{123} = 25$		$НП_\phi$

та ліцензійні порушення. Дозвіл на експлуатацію клубу був відсутній. **Четвертим небезпечним чинником** стала відсутність справних протипожежних засобів. Вогнегасник, який було знайдено для ліквідації загоряння, не спрацював, а система, яка б могла завчасно загасити пожежу, була відсутня. Крім того, відсутність потужної системи димовиведення призвело до отруєння токсичним димом (асфіксія + синильна кислота HCN від горіння поліуретанової піни). Близько 90 % + загиблих померли саме від цього, а не від опіків чи вогню (в табл. 6 наведено розрахунок ризику за матрицею 10 на 10, де ймовірність представлена за шкалою від 0 до 1, а тяжкість наслідків від 1 до 10; при цьому, коли від 5 і більше балів ризик є неприйнятним).

Пропонується розглядати два фундаментально різні типи ризиків, пов'язаних з феєрверками – «Місце виробництва/зберігання» та «Місце використання/споживання», бо вони мають різні небезпечні чинники, сценарії, причино-наслідковий зв'язок та вимагають різних запобіжних і захисних заходів. Історично за останні роки ризик, пов'язаний з феєрверками, змістився з виробничої сфери у споживчу. Найбільш смертоносні інциденти ХХІ століття відбуваються не на заводах, а в місцях масового скупчення людей. Найбільш катастрофічні інциденти сталися в країнах Латинської Америки та Азії, що може свідчити про системні проблеми з регулюванням та культурою безпеки як з «виробничою» та «споживацькою». Пожежі в нічних клубах, ініційовані піротехнікою, є глобальним, повторюваним сценарієм в світі, що вказує на системний провал у застосуванні базових норм пожежної безпеки [17]. Визначення зон ризику допомагає вжити необхідні заходи для здоров'я та безпеки працівників [22].

На основі виявлених небезпечних чинників ризику можна запропонувати наступні

рекомендації з пожежної безпеки, яка є важливою складовою повоєнної безпекової моделі України, для зацікавлених сторін, а також для міжнародних організацій та асоціацій.

Для регуляторних органів щодо промислової безпеки:

- посилити процедури ліцензування та частоту інспекцій на підприємствах, що виробляють та зберігають піротехніку;
- впровадити та суворо контролювати дотримання вимог до зонування, що передбачають створення обов'язкових буферних зон навколо небезпечних об'єктів для захисту житлових районів.

Для регуляторних органів щодо громадської безпеки:

- розглянути можливість введення повної заборони на використання будь-яких піротехнічних виробів (включаючи «сценічні» та «холодні фонтани») у закритих громадських приміщеннях (нічних клубах, ресторанах, концертних залах), які не мають спеціалізованих систем пожежогасіння та димовидалення, сертифікованих для таких заходів;
- посилити кримінальну та адміністративну відповідальність власників розважальних закладів за порушення пожежних норм, особливо щодо використання легкозаймистих матеріалів в оздобленні та забезпечення функціонування аварійних виходів;
- жорстко регулювати роздрібний продаж піротехніки, особливо на відкритих ринках, забороняючи її зберігання у великих кількостях у місцях скупчення людей.

Для організаторів публічних заходів та власників закладів:

- проводити обов'язкову, документовану оцінку ризиків перед використанням будь-яких піротехнічних засобів;
- залучати до роботи виключно сертифікованих піротехніків та віддавати перевагу безпечнішим альтернативам (наприклад, світловим ефектам).

Для міжнародних організацій та асоціацій:

- створити та підтримувати глобальну відкриту базу даних інцидентів для аналізу та обміну досвідом;
- розробити та просувати міжнародні стандарти безпеки для розважальних закладів, щоб уроки, винесені з трагедій в одній країні, ставали обов'язковими для виконання в інших, розриваючи таким чином цикл повторюваних катастроф.

Висновки. Розроблена модель керування ризиками комплексних небезпечних подій (інцидентів) є багаторівневою та ескалаційною, що відрізняє її від класичних однорівневих моделей (наприклад, стандартної Bow-Tie), оскільки враховує ланцюг небезпечних подій, які характеризуються зростанням тяжкості наслідків.

Розроблена модель інтегрує кількісну оцінку ризиків від комплексних небезпечних подій з урахуванням зростання ймовірності їх настання від впливу небезпечних чинників, що дозволяє переходити від реактивного до проактивного підходу запобігання небезпечним подіям.

Проведений аналіз інцидентів з феєрверками за останні 50 років виявив ключову закономірність, що полягає у зростанні рівня ризику настання небезпечної події (пожежі) в місцях масового скупчення людей через використання горючих матеріалів для оздоблення приміщень, переповненість місць відпочинку, накопичення токсичного диму та недостатню кількість евакуаційних виходів.

Запропоновано розрізнити два типи ризиків комплексних небезпечних подій (інцидентів) з феєрверками – це «місце виробництва/зберігання», де відбувається детонація маси піротехніки, та «місце використання/споживання», де відбуваються пожежі в закритих приміщеннях.

Розроблені рекомендації для регуляторів ринку щодо посилення ліцензування, заборони використання піротехніки, забезпечення умов для оцінки ризиків настання комплексних небезпечних подій (інцидентів), створення глобальної бази даних причин настання небезпечних подій з феєрверками.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Chen X. L., Wang Y. J., Wang C. R., Hu D. L., Sun Y. X., Li S. S. Burns due to gunpowder explosions in fireworks factory: a 13-year retrospective study. *Burns*. 2002. Vol. 28, No. 3. P. 245–249. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0305-4179\(01\)00122-x](https://doi.org/10.1016/s0305-4179(01)00122-x)
2. León D., Castells B., Amez I., Casín J., García-Torrent J. Experimental quantification of fire damage inside pyrotechnic stores. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, No. 10. Art. 6181. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13106181>
3. León D., Amez I., Radojević M., Manić N., Stojiljković D. Emissions and fire risk assessment of nitrocellulose as a sustainable alternative in pyrotechnic compositions. *Fire*. 2024. Vol. 7, No. 8. Art. 265. DOI: <https://doi.org/10.3390/fire7080265>
4. U.S. Consumer Product Safety Commission. (2024). *2023 Fireworks Annual Report*. URL: <https://www.cpsc.gov/s3fs-public/2023-Fireworks-Annual-Report.pdf>
5. Nallathambi I., Savaram P., Sengan S., et al. Impact of fireworks industry safety measures and prevention management system on human error mitigation using a machine learning approach. *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 9. Art. 4365. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23094365>
6. Ajith S., Sivapragasam C., Arumugaprabu V. A review on hazards and their consequences in firework industries. *SN Applied Sciences*. 2019. Vol. 1, No. 1. Art. 120. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-018-0129-1>
7. Vermeij E., Duvalois W., Webb R., Koeberg M. Morphology and composition of pyrotechnic residues formed at different levels of confinement. *Forensic Science International*. 2009. Vol. 186, No. 1–3. P. 68–74. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2009.01.019>
8. Zwicky F. *Discovery, invention, research through the morphological approach*. New York : Macmillan, 1969. URL: <https://archive.org/details/discoveryinventi0000zwic/page/n5/mode/2up>
9. Surianarayanan M., Sivapirakasam S. P., Swaminathan G. Accident data analysis and hazard assessment in fireworks manufacture. *Technology of Energetic Materials*. 2008. Vol. 69, No. 6. P. 161–168.
10. Zhao J.-Q., Cheng Y.-C., Hou H.-Y., Chen W.-C. Applications of intrinsic safety characteristic parameters of propellant dust: Commercial multi-tube pyrotechnic hazard assessment. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2021. Vol. 69. Art. 104381. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104381>
11. Lin W.-C., Chen W.-C., Shu C.-M. Thermal stability evaluation of multiple tubes of fireworks by calorimetry approaches. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2019. Vol. 138. P. 2883–2890. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08496-y>
12. Shams Vahdati S., Hemmate Gadim J., Mazouchian H. Fireworks-related injuries in Iran: a survey following the 2014 New Year's festival in Tabriz. *Trauma Monthly*. 2016. Vol. 21, No. 3. e20013. <https://doi.org/10.5812/traumamon.20013>
13. van Kamp I., van der Velden P. G., Stellato R. K., et al. Physical and mental health shortly after a disaster: first results from the Enschede firework disaster study. *European Journal of Public Health*. 2006. Vol. 16, No. 3. P. 252–258. DOI: <https://doi.org/10.1093/eurpub/cki188>
14. Wikipedia contributors. List of fireworks accidents and incidents. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_fireworks_accidents_and_incidents
15. Grosshandler W., Bryner N., Madrzykowski D., Kuntz K. *Report of the technical investigation of The*

Station nightclub fire (NIST NCSTAR 2). Gaithersburg: NIST, 2005. URL: <https://www.nist.gov/publications/report-technical-investigation-station-nightclub-fire-nist-ncstar-2-volume-1>

16. CROSS UK. Fires in nightclubs started by pyrotechnics. *CROSS Feature Article*. 2025. URL: <https://www.cross-safety.org/uk/safety-information/cross-feature-article/fires-nightclubs-started-pyrotechnics>

17. Monzón F. Post-incident egress analysis of the Kiss nightclub fire using network modeling. In: *Proceedings of University of Canterbury Fire Engineering Conference*. Christchurch, 2016.

18. Manea F., Ilia G., Ghicioi E., Pupazan D. G., Prodan M., Nicola A. H. The experimental study of flame behavior of flexible polyurethane foam as a sound-absorbing element. *Fire*. 2025. Vol. 8, No. 4. Art. 127. DOI: <https://doi.org/10.3390/fire8040127>

19. Piriú L. E., Friedrich A. W., Rossen J. W., et al. Extensive colonization with carbapenemase-producing microorganisms in Romanian burn patients: infectious consequences from the Colectiv fire disaster. *European Journal of Clinical Microbiology & Infectious Diseases*. 2018. Vol. 37. P. 175–183. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10096-017-3118-1>

20. Lu P., Li Y. Agent-based fire evacuation model using social learning theory and intelligent optimization algorithms. *Reliability Engineering & System Safety*. 2025. Vol. 260. Art. 111000. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.111000>

21. Ajith S., Arumugaprabu V., Ajith V., et al. Hazard identification and risk assessment in firework industry. *Materials Today: Proceedings*. 2025. Vol. 56, No. 3. P. 1083–1085. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.102>

REFERENCES

1. Chen, X. L., Wang, Y. J., Wang, C. R., Hu, D. L., Sun, Y. X., & Li, S. S. (2002). Burns due to gunpowder explosions in fireworks factory: A 13-year retrospective study. *Burns*, 28(3), 245–249. [https://doi.org/10.1016/s0305-4179\(01\)00122-x](https://doi.org/10.1016/s0305-4179(01)00122-x)

2. León, D., Castells, B., Amez, I., Casín, J., & García-Torrent, J. (2023). Experimental quantification of fire damage inside pyrotechnic stores. *Applied Sciences*, 13(10), 6181. <https://doi.org/10.3390/app13106181>

3. León, D., Amez, I., Radojević, M., Manić, N., & Stojiljković, D. (2024). Emissions and fire risk assessment of nitrocellulose as a sustainable alternative in pyrotechnic compositions. *Fire*, 7(8), 265. <https://doi.org/10.3390/fire7080265>

4. U.S. Consumer Product Safety Commission. (2024). *2023 fireworks annual report*. Retrieved from: <https://www.cpsc.gov/s3fs-public/2023-Fireworks-Annual-Report.pdf>

5. Nallathambi, I., Savaram, P., Sengan, S., et al. (2023). Impact of fireworks industry safety measures and prevention management system on human error

mitigation using a machine learning approach. *Sensors*, 23(9), 4365. <https://doi.org/10.3390/s23094365>

6. Ajith, S., Sivapragasam, C., & Arumugaprabu, V. (2019). A review on hazards and their consequences in firework industries. *SN Applied Sciences*, 1(1), 120. <https://doi.org/10.1007/s42452-018-0129-1>

7. Vermeij, E., Duvalois, W., Webb, R., & Koeberg, M. (2009). Morphology and composition of pyrotechnic residues formed at different levels of confinement. *Forensic Science International*, 186(1–3), 68–74. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2009.01.019>

8. Zwicky, F. (1969). *Discovery, invention, research through the morphological approach*. Macmillan. Retrieved from: <https://archive.org/details/discoveryinventi0000zwic/page/n5/mode/2up>

9. Surianarayanan, M., Sivapirakasam, S. P., & Swaminathan, G. (2008). Accident data analysis and hazard assessment in fireworks manufacture. *Technology of Energetic Materials*, 69(6), 161–168.

10. Zhao, J.-Q., Cheng, Y.-C., Hou, H.-Y., & Chen, W.-C. (2021). Applications of intrinsic safety characteristic parameters of propellant dust: Commercial multi-tube pyrotechnic hazard assessment. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 69, 104381. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104381>

11. Lin, W.-C., Chen, W.-C., & Shu, C.-M. (2019). Thermal stability evaluation of multiple tubes of fireworks by calorimetry approaches. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 138, 2883–2890. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08496-y>

12. Shams Vahdati, S., Hemmate Gadim, J., & Mazouchian, H. (2016). Fireworks-related injuries in Iran: A survey following the 2014 New Year's festival in Tabriz. *Trauma Monthly*, 21(3), e20013. <https://doi.org/10.5812/traumamon.20013>

13. van Kamp, I., van der Velden, P. G., Stelato, R. K., et al. (2006). Physical and mental health shortly after a disaster: First results from the Enschede firework disaster study. *European Journal of Public Health*, 16(3), 252–258. <https://doi.org/10.1093/eurpub/cki188>

14. Wikipedia contributors. (2026). List of fireworks accidents and incidents. Retrieved from: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_fireworks_accidents_and_incidents

15. Grosshandler, W., Bryner, N., Madrzykowski, D., & Kuntz, K. (2005). *Report of the technical investigation of The Station nightclub fire (NIST NCSTAR 2)*. National Institute of Standards and Technology. Retrieved from: <https://www.nist.gov/publications/report-technical-investigation-station-nightclub-fire-nist-ncstar-2-volume-1>

16. CROSS UK. (2025). Fires in nightclubs started by pyrotechnics. *CROSS Feature Article*. Retrieved from: <https://www.cross-safety.org/uk/safety-information/cross-feature-article/fires-nightclubs-started-pyrotechnics>

17. Monzón, F. (2016). Post-incident egress analysis of the Kiss nightclub fire using network modeling. In *Proceedings of University of Canterbury Fire Engineering Conference*. Christchurch, New Zealand.
18. Manea, F., Iliu, G., Ghicioi, E., Pupazan, D. G., Prodan, M., & Nicola, A. H. (2025). The experimental study of flame behavior of flexible polyurethane foam (sponge) as a sound-absorbing element. *Fire*, 8(4), 127. <https://doi.org/10.3390/fire8040127>
19. Piri, L. E., Friedrich, A. W., Rossen, J. W., et al. (2018). Extensive colonization with carbapenemase-producing microorganisms in Romanian burn patients: Infectious consequences from the Colectiv fire disaster. *European Journal of Clinical Microbiology & Infectious Diseases*, 37, 175–183. <https://doi.org/10.1007/s10096-017-3118-1>
20. Lu, P., & Li, Y. (2025). Agent-based fire evacuation model using social learning theory and intelligent optimization algorithms. *Reliability Engineering & System Safety*, 260, 111000. <https://doi.org/10.1016/j.res.2025.111000>
21. Ajith, S., Arumugaprabu, V., Ajith, V., et al. (2025). Hazard identification and risk assessment in firework industry. *Materials Today: Proceedings*, 56(3), 1083–1085. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.102>

© В. А. Цопа, С. І. Чеберячко, Ю. І. Чеберячко, О. В. Дерюгін, Г. І. Туровська

Оглядова стаття

Дата першого надходження статті до видання: 08.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.48.2026.15>

Д. О. Шалапко¹, Н. В. Гречка²

¹ Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4311-3908> – Д. О. Шалапко

<https://orcid.org/0009-0007-9310-7614> – Н. В. Гречка

✉ denys.shalapko@nuos.edu.ua

СЦЕНАРНО-ОРІЄНТОВАНИЙ ПІДХІД ДО ОЦІНЮВАННЯ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ СУДНОВИХ ЕНЕРГОУСТАНОВОК ПРИ ВИКОРИСТАННІ ВОДНЮ ЯК ДОМІШКИ ДО ДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА

Проблема. У сучасних дослідженнях суднових двигунів внутрішнього згоряння розглядаються різні варіанти використання водню як добавки до основного палива, зокрема в якості мікродомішки для покращення експлуатаційних та екологічних показників. Водночас фізико-хімічні властивості водню формують новий профіль пожежо- та вибухопожежної небезпеки машинного відділення, пов'язаний із витоками, швидкою дифузиею та накопиченням газоповітряних сумішей. Існуючі підходи не забезпечують узгодженої ризик-орієнтованої оцінки пожежної безпеки саме для дизельних суднових енергетичних установок (СЕУ) з водневою домішкою.

Мета. Розроблення сценарно- та ризик-орієнтованої методики оцінювання пожежної безпеки суднових енергоустановок при впровадженні водню як добавки до дизельного палива.

Методи. Застосовано сценарний аналіз із формуванням типових аварійних сценаріїв S1–S4 (мікротоки без/з займанням, масовані витоки з негайним займанням та за неефективною вентиляцією). Для кількісної оцінки використано систему критеріїв: умовна ймовірність займання, інтенсивність теплового потоку, час досягнення граничних температур і час збереження функціональності критичних систем. Узагальнення виконано за матрицею «ймовірність–наслідки» та інтегральним показником пожежної небезпеки.

Результати. Показано, що без спеціальних заходів інтеграція водню призводить до зростання пожежного ризику за рахунок сценаріїв масованих витоків. Запропонований інтегральний показник дозволяє порівняльно оцінювати конфігурації СЕУ та кількісно обґрунтовувати ефективність вентиляції, газодетекції, автоматичних блокувань і конструктивного теплозахисту. Продемонстровано зниження інтегрального ризику до рівня, близького до традиційної дизельної СЕУ, за умови комплексної оптимізації.

Висновки. Розроблена методика забезпечує системний перехід від якісної оцінки небезпек до інженерно обґрунтованого управління пожежним ризиком у двопаливних суднових енергоустановках і може застосовуватися на етапах проектування та модернізації з урахуванням вимог пожежної безпеки. У роботі розглянуто не спалювання водню як самостійного палива, а використання його малої домішки до дизельного палива в кількості до 0,1 % за масою, що вводиться безпосередньо у паливопровід високого тиску перед форсункою. За такого підходу змінюється конфігурація потенційних пожежонебезпечних зон і виникає потреба в окремому ризик-орієнтованому оцінюванні пожежної безпеки суднової енергоустановки.

Ключові слова: пожежна безпека, суднова енергоустановка, водень, сценарний аналіз, ризик-орієнтована оцінка, вентиляція, газодетекція.

SCENARIO-ORIENTED APPROACH TO ASSESSING FIRE SAFETY OF SHIP POWER PLANTS USING HYDROGEN AS AN ADDITIVE TO DIESEL FUEL

Problem. Current research on marine internal combustion engines explores various options for using hydrogen as a fuel additive, particularly as a micro-impurity to enhance operational and environmental performance. At the same time, the physicochemical properties of hydrogen create a new fire and explosion hazard profile in the engine room, associated with leaks, rapid diffusion, and the accumulation of gas-air mixtures. Existing approaches do not provide a coherent risk-oriented fire safety assessment specifically for diesel marine power plants using hydrogen additives.

Objective. To develop a scenario- and risk-oriented methodology for assessing the fire safety of marine power plants when implementing hydrogen as a diesel fuel additive.

Methods. Scenario analysis was applied, involving the formulation of typical accident scenarios S1–S4 (micro-leaks with/without ignition, massive leaks with immediate ignition, and leaks under ineffective ventilation). A system of criteria was used for quantitative assessment: conditional ignition probability, heat flux intensity, time to reach threshold temperatures, and the duration of functional integrity for critical systems. The generalization was performed using a “probability-consequence” matrix and an integral fire hazard index.

Results. It is shown that without special measures, hydrogen integration leads to an increase in fire risk due to massive leak scenarios. The proposed integral index allows for a comparative assessment of marine power plant configurations and provides a quantitative basis for the effectiveness of ventilation, gas detection, automatic interlocks, and structural thermal protection. A reduction in integral risk to a level close to traditional diesel power plants was demonstrated under the condition of comprehensive optimization.

Conclusions. The developed methodology ensures a systematic transition from qualitative hazard assessment to engineering-based fire risk management in dual-fuel marine power plants and can be applied during the design and modernization stages in compliance with fire safety requirements. This study considers the use of a small hydrogen additive (up to 0.1 % by mass) introduced directly into the high-pressure fuel line before the injector, rather than the combustion of hydrogen as a standalone fuel. This approach changes the configuration of potential fire-hazardous zones and necessitates a separate risk-oriented fire safety assessment of the marine power plant.

Key words: fire safety; ship power plant; hydrogen; scenario analysis; risk-oriented assessment; ventilation; gas detection.

Постановка проблематики дослідження. У сучасних дослідженнях суднових двигунів внутрішнього згоряння та суднових енергетичних установках (СЕУ) розглядаються різні варіанти використання водню як добавки до основного палива, зокрема в якості мікродомішки для покращення експлуатаційних та екологічних показників [5]. Для суднових енергоустановок такі рішення становлять інтерес передусім як окремий клас технічних модифікацій паливної системи та робочого процесу двигуна. Однак інтеграція водневої підсистеми, навіть за малих витрат H_2 , призводить до появи додаткових джерел пожежної та вибухопожежної небезпеки, пов'язаних із витоками газу, його накопиченням у локальних зонах машинного відділення та можливим займанням [5, 6]. При цьому предметом розгляду не є повномасштабне використання водню як окремого моторного палива. Дослідження стосується режиму мікродозування водню як добавки до дизельного палива, орієнтовно до 0,1 % за масою, при введенні у паливопровід високого тиску перед форсункою. Така схема принципово відрізняється від подачі водню

у впускний тракт, оскільки не передбачає формування значних об'ємів попередньо змішаних воднево-повітряних сумішей у впускній системі.

Разом з тим, фізико-хімічні властивості водню – низька енергія займання, широкий діапазон концентрацій займистості, висока швидкість полум'я та схильність до швидкої дифузії – зумовлюють формування принципово нового профілю пожежота вибухонебезпеки суднових енергоустановок [3, 10]. На відміну від традиційних рідких палив, водень у разі витоку швидко утворює газоповітряні суміші, здатні накопичуватися у верхніх зонах машинного відділення та локальних «кишенях», що істотно ускладнює прогнозування розвитку аварійних подій [7, 9]. Додатковим фактором ризику є поєднання водневої підсистеми з наявними джерелами займання у машинному відділенні – гарячими поверхнями, електрообладнанням і системами випуску відпрацьованих газів [1, 4].

Аналіз наукових публікацій свідчить, що більшість досліджень двопаливного режиму «дизель– H_2 » зосереджені на оцінюванні ефективності, токсичності та стабільності згоряння, тоді як питання

пожежної безпеки розглядаються фрагментарно або опосередковано, без формалізації критеріїв ризику та запасу вогнестійкості елементів суднової енергоустановки [11, 13]. Водночас роботи, присвячені пожежній безпеці водневих систем, здебільшого орієнтовані на стаціонарні об'єкти або судна з паливними елементами і не враховують специфіку двопаливного дизельного двигуна як джерела високотемпературних і термомеханічних навантажень [7, 8].

У зв'язку з цим актуальним є розроблення цілісного підходу, який поєднує аналіз робочого процесу дизельного двигуна у режимі «дизель– H_2 » зі сценарним та ризик-орієнтованим оцінюванням пожежної небезпеки суднової енергоустановки. Такий підхід має забезпечити науково обґрунтований вибір конструктивно-технологічних рішень і систем пожежного захисту при інтеграції водню у суднові енергоустановки з урахуванням міжнародних нормативних вимог і risk-based методик [1, 7].

Сучасний стан наукових досліджень і нормативних підходів. Сучасні наукові дослідження двопаливного режиму роботи дизельних двигунів із водневою добавкою переважно зосереджені на оцінюванні показників ефективності, токсичності відпрацьованих газів та особливостей процесу згоряння [11, 13]. Експериментальні та розрахункові роботи показують, що введення водню здатне скорочувати затримку займання, зміщувати фазування тепловиділення в бік раннього згоряння та підвищувати швидкість фронту полум'я [5, 11]. Разом із позитивним впливом на індикаторний ККД і зниженням викидів CO та сажі це супроводжується зростанням пікових температур і тисків у циліндрі, що може призводити до локальних перегрівів елементів камери згоряння, випускного тракту та прилеглих конструкцій суднової енергоустановки [11, 13].

Для суднових дизельних двигунів зазначені ефекти мають особливе значення з огляду на тривалі режими роботи під навантаженням і обмежені можливості тепловідведення у машинному відділенні. Чисельні дослідження підтверджують, що зі збільшенням частки водню зростає неоднорідність температурних полів, а у разі порушення оптимального фазування упорскування дизельного палива можливе утворення незгорілого водню, який надходить у випускний тракт [11, 12]. Такий водень може виступати додатковим чинником пожежної небезпеки, особливо у поєднанні з високими температурами випускних газів і поверхонь теплообмінного обладнання [3, 4].

Паралельно розвиваються дослідження пожежної та вибухопожежної безпеки водневих систем,

у яких основну увагу приділено витокам, дифузії та формуванню займистих газоповітряних сумішей у замкнених або обмежено вентильованих просторах [7, 9]. Показано, що швидка дифузія водню не гарантує його безпечного розсіювання у складних геометріях, характерних для машинних відділень суден, де можливе формування локальних зон накопичення під перекриттями та між конструктивними елементами [8, 10]. Визначальну роль у зниженні ризику в таких умовах відіграють параметри вентиляції, своєчасність газодетекції та ефективність автоматичного відключення подачі водню, що підкреслюється як у нормативних документах, так і в аналітичних оглядах [3, 4].

Разом з тим, аналіз літератури свідчить про відсутність узгодженого методичного підходу, який би поєднував результати досліджень робочого процесу дизельного двигуна у режимі з додаванням водню з оцінюванням пожежної небезпеки суднової енергоустановки в цілому [10, 11]. Існуючі нормативні вимоги та рекомендації орієнтовані або на традиційні дизельні установки, або на водневі системи з паливними елементами, що зумовлює необхідність розроблення спеціалізованої ризик-орієнтованої методики для двопаливних суднових енергоустановок [1, 2].

Об'єкт дослідження та постановка наукової задачі. Об'єктом дослідження є суднова енергетична установка з традиційним середньооборотним дизельним двигуном, модернізована для роботи у двопаливному режимі «дизельне паливо – водень», у складі машинного відділення морського транспортного судна. Як базову прийнято компоновку типової СЕУ з головним дизельним двигуном, дизель-генераторами, системами паливоподачі, вентиляції та пожежогашіння, у яку інтегровано підсистему виробництва, транспортування й дозованого введення водню у паливну систему двигуна [1, 2]. На рис. 1 наведено узагальнену структурну схему СЕУ з інтегрованою водневою підсистемою, що визначає межі аналізу небезпек та місця формування ініціюючих відмов [4].

У подальшому для ризик-орієнтованого аналізу приймається режим малої добавки водню до дизельного палива, характерний для мікродозування, з граничним рівнем близько 0,1 % за масою. Особливістю розглядуваної схеми є введення малих домішок водню безпосередньо в паливопровід високого тиску перед форсункою, що дозволяє уникнути подачі газу у випускний тракт і зменшити об'єм потенційного утворення воднево-повітряних сумішей [5, 6]. Такий підхід підтверджено експериментальними дослідженнями,

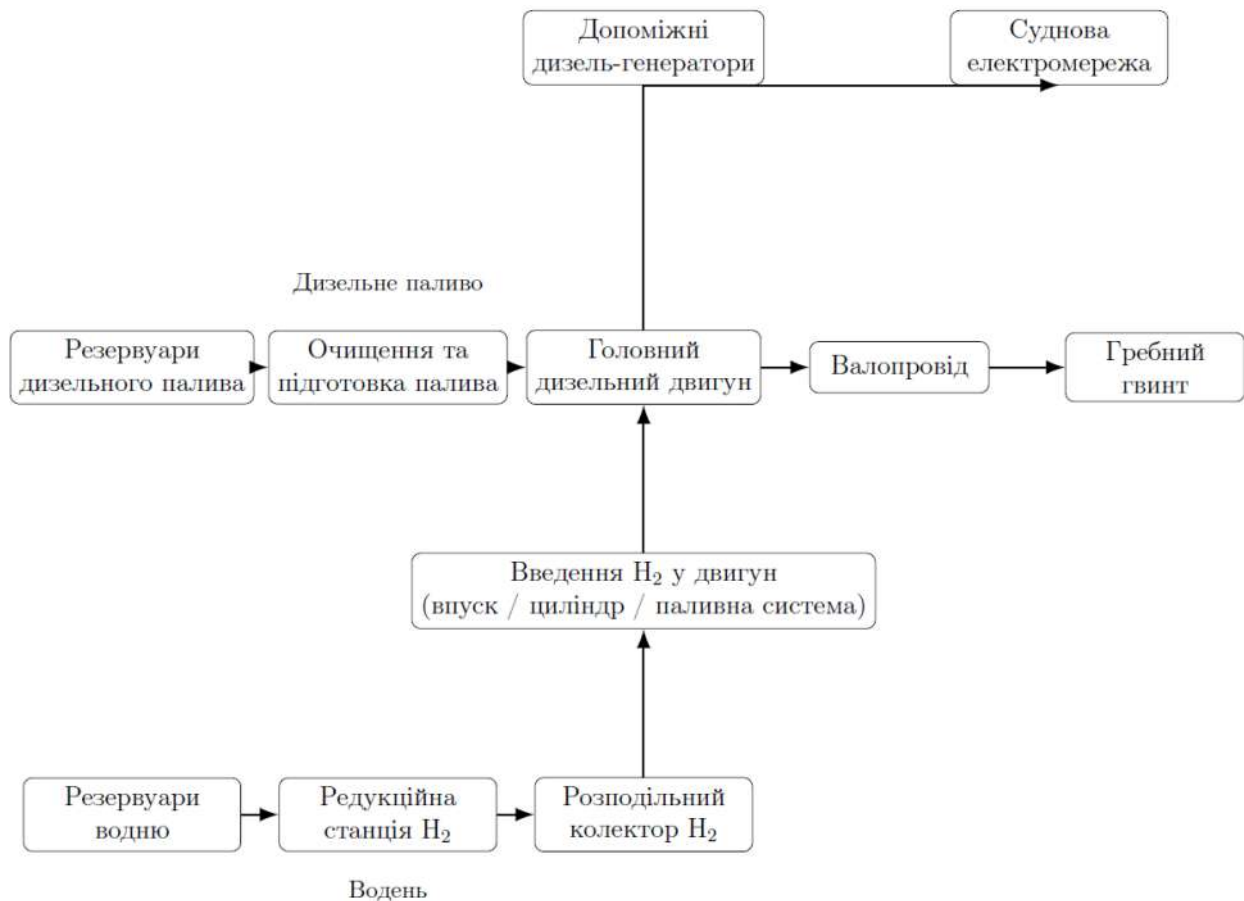


Рис. 1. Узагальнена структурна схема суднової енергоустановки з інтегрованою підсистемою подачі водню

у яких показано зміну параметрів упорскування та розпилювання без формування значних об'ємів горючих сумішей у впускній системі [6].

Водночас на рівні машинного відділення з'являються нові елементи підвищеної небезпеки: агрегат виробництва водню, буферні ємності, трубопроводи та арматура середнього тиску, а також локальні вузли дозування. Саме ці елементи формують додаткові джерела пожежної та вибухопожежної небезпеки, відмінні за характером від традиційних дизельних систем, що потребує окремого аналізу з позицій водневої безпеки та вимог до компоновки і захисних бар'єрів [3, 4].

Предметом дослідження є закономірності формування пожежонебезпечних станів у суднової енергоустановці при роботі з використанням водневих мікродомішок в суднових енергетичних установках (СЕУ), а також вплив конструктивно-технологічних рішень і систем безпеки на вогнестійкість огорожувальних конструкцій та інтегральний рівень пожежного ризику.

На основі аналізу літературних джерел і практичних особливостей експлуатації СЕУ сформульовано такі ключові **науково-технічні задачі дослідження**:

- ідентифікувати характерні пожежонебезпечні сценарії, пов'язані з витокami водню та його займанням у машинному відділенні;
- визначити критерії оцінювання пожежної небезпеки й вогнестійкості елементів СЕУ з урахуванням теплових і газодинамічних впливів;
- проаналізувати вплив конструктивних рішень (розміщення обладнання, трасування трубопроводів, застосування теплових екранів) на рівень пожежного ризику;
- обґрунтувати роль вентиляції, газодетекції та алгоритмів керування як ключових елементів системи цивільного захисту при використанні водню на судах.

Розв'язання цих задач створює основу для переходу від фрагментарної оцінки окремих небезпечних факторів до системного аналізу пожежної безпеки суднових енергоустановок на режимі з використанням водню в СЕУ.

Викладення основного матеріалу дослідження. Формування пожежонебезпечних сценаріїв роботи суднової енергоустановки. Оцінювання пожежної безпеки суднової енергоустановки при використанні водню як добавки до дизельного палива доцільно виконувати на основі сценарного підходу, який широко застосовується

в аналізі ризиків водневих систем і суднових енергетичних установок [7, 9]. Такий підхід дозволяє врахувати не лише сам факт наявності горючого газу, а й комбінацію умов, за яких потенційна небезпека реалізується у вигляді надзвичайної ситуації, що відповідає сучасним вимогам ризикорієнтованого проєктування [8, 10].

У межах дослідження сценаріїв розглядається як формалізований ланцюг подій, що включає ініціюючу відмову, умови розвитку процесу та кінцеві наслідки для конструкцій і систем судна. Просторове розташування джерел витоку водню та потенційних джерел запалювання істотно визначає тип сценарію та рівень його наслідків, що є характерною особливістю машинних відділень суден зі складною геометрією і багаторівневою компоновкою обладнання [9, 10]. Схема зонування машинного відділення з виділенням потенційно небезпечних зон наведена на рис. 2.

Формування сценаріїв ґрунтується на узгодженні трьох визначальних факторів: масштабу витоку водню, просторового розташування джерела витоку в машинному відділенні та функціонального стану систем безпеки (вентиляції, газодетекції, автоматичних блокувань), що відповідає підходам, рекомендованим у нормативних і методичних документах з водневої безпеки [3, 4]. З урахуванням конструктивних особливостей підсистеми подачі H_2 доцільно виділяти декілька характерних зон можливого витоку: агрегат виробництва та буферного зберігання водню, газову арматуру середнього тиску, трубопроводи у верхніх частинах машинного відділення, а також локальні вузли дозування на лініях високого тиску

перед форсунками, які формують основні ініціюючі події для сценарного аналізу [7, 8]. За масштабом аварії розрізняють мікровитоки, що характеризуються малою витратою та тривалим часом розвитку, і масовані витоки, пов'язані з раптовим руйнуванням трубопроводів або арматури.

Додатковим виміром є стан вентиляції та газодетекції: від штатної роботи систем до їх часткової або повної відмови. Комбінація зазначених факторів дозволяє сформувати обмежену, але репрезентативну множину базових сценаріїв, які охоплюють основні небезпечні ситуації для двопаливної СЕУ.

У роботі виділено чотири узагальнені сценарії S1–S4. Сценарій S1 відповідає мікровитоку водню за умов ефективної вентиляції без займання, коли основним ризиком є накопичення горючої суміші до концентрацій, близьких до нижньої межі займистості. Сценарій S2 описує мікровитік з відкладеним займанням, при якому локально сформована хмара H_2 запалюється від випадкового джерела. Сценарій S3 характеризується масованим витоком з негайним займанням і формуванням факельної пожежі, що створює інтенсивний тепловий вплив на конструкції. Найбільш несприятливим є сценарій S4, коли масований витік поєднується з неефективною вентиляцією, що призводить до накопичення об'ємної вибухонебезпечної хмари та можливого вибухового горіння. Структурно-логічний зв'язок між сценаріями S1–S4 та набором критеріїв для їх кількісної оцінки наведено на рис. 3.

Запропонована система сценаріїв слугує базою для подальшого кількісного аналізу пожежної

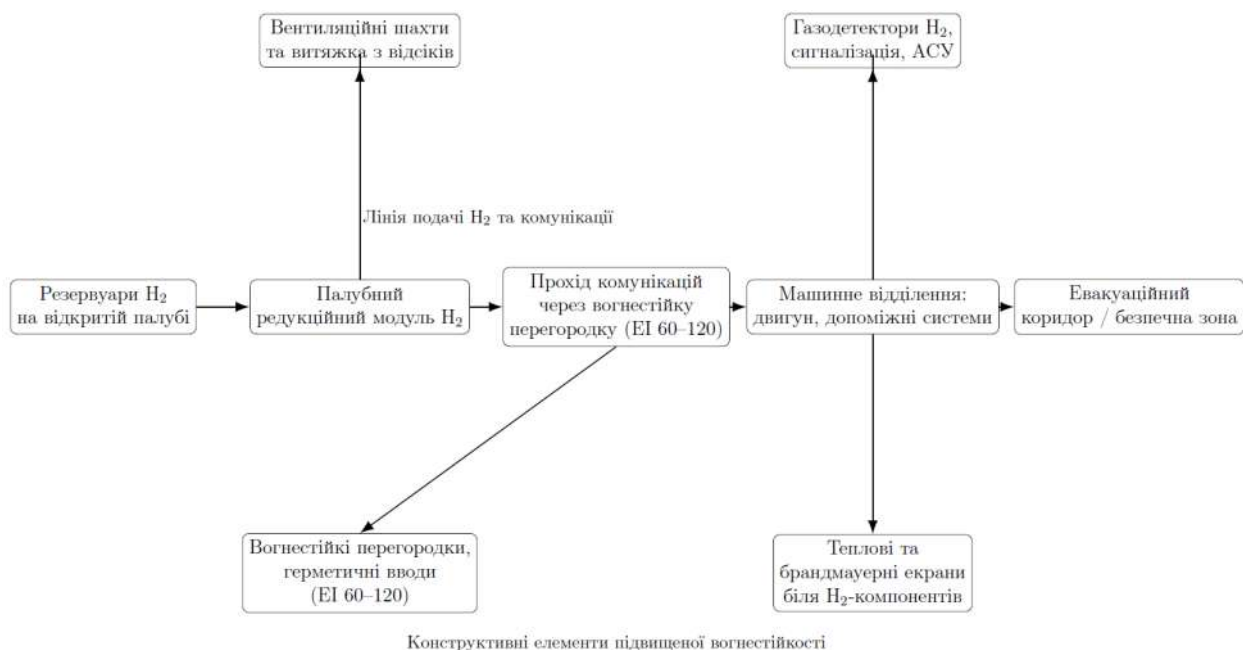


Рис. 2. Схематичний план машинного відділення з позначенням основних агрегатів, гарячих поверхонь та потенційних зон акумуляції водню

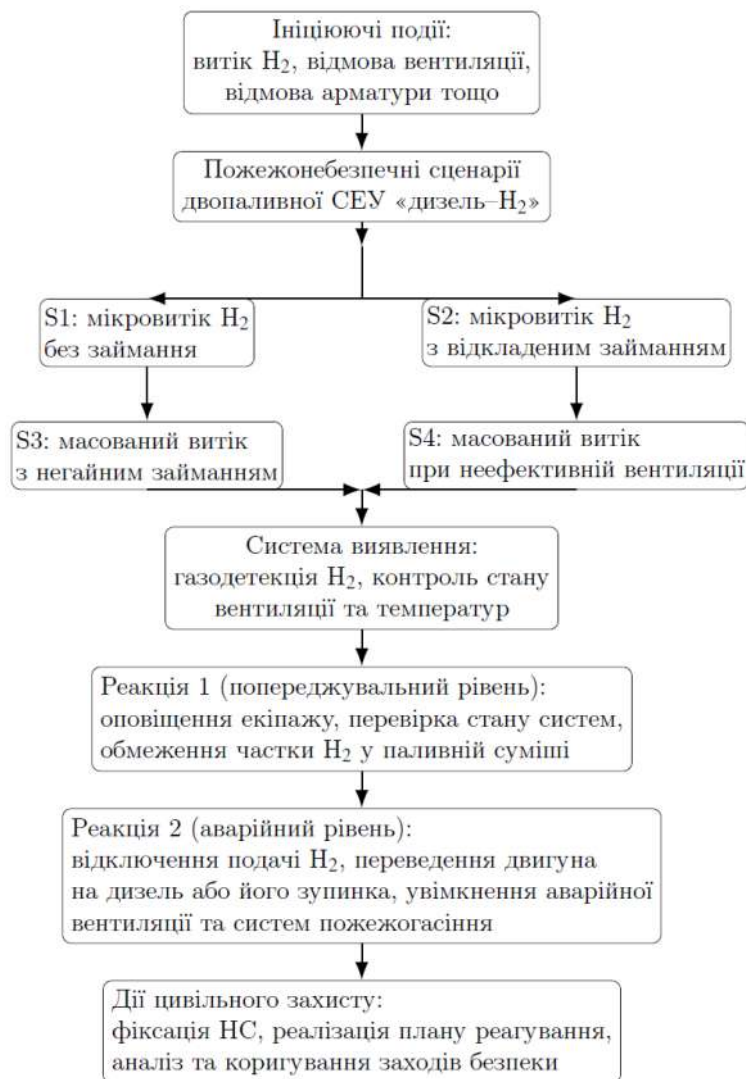


Рис. 3. Структурно-логічна схема зв'язку між базовими сценаріями S1–S4 та критеріями їх оцінювання

небезпеки та оцінювання вогнестійкості елементів суднової енергоустановки.

Критерії оцінювання пожежної небезпеки та вогнестійкості. Кількісна оцінка пожежної небезпеки суднової енергоустановки в двопаливному режимі «дизель – водень» потребує введення системи критеріїв, здатних відобразити як імовірність реалізації небезпечної події, так і тяжкість її наслідків для конструкцій, обладнання та безпеки екіпажу. У межах сценарного підходу такі критерії повинні бути уніфікованими для сценаріїв S1–S4 та придатними для порівняльного аналізу різних конструктивно-технологічних рішень. Вихідні дискретизовані оцінки P і C для сценаріїв S1–S4 до/після впровадження заходів наведено в табл. 1; на їх основі побудовано матрицю ризику (рис. 4). У роботі величина P не є математичною ймовірністю у строгому сенсі, а являє собою дискретну експертно-аналітичну оцінку рівня імовірності реалізації сценарію за шкалою 1–5. Для забезпечення однозначності інтерпретації

матриці ризику в роботі використано п'ятирівневі дискретні шкали імовірності реалізації сценарію та тяжкості його наслідків.

Рівень $P = 1$ відповідає малоімовірному сценарію, реалізація якого можлива лише за несприятливого поєднання кількох відмов або порушень експлуатації; $P = 2$ – низькій імовірності за наявності окремих відмов або локальних відхилень режиму; $P = 3$ – помірній імовірності реалізації за типових експлуатаційних умов при частковій деградації захисних функцій; $P = 4$ – високій імовірності у разі поєднання характерних відмов елементів системи та недостатньої ефективності запобіжних заходів; $P = 5$ – дуже високій імовірності, коли сценарій практично очікуваний за відмови основних бар'єрів безпеки.

Шкала наслідків також має п'ять рівнів: $C = 1$ – незначні наслідки без втрати функціональності СЕУ та без небезпеки для екіпажу; $C = 2$ – локальні пошкодження або короточасні порушення роботи окремих підсистем; $C = 3$ – помітні функціональні

порушення, що потребують втручання персоналу та відновлювальних дій; $C = 4$ – тяжкі наслідки з істотним пошкодженням обладнання, втратою працездатності частини систем і високою загрозою для персоналу; $C = 5$ – критичні наслідки, пов’язані з великомасштабним пошкодженням, можливою втратою функціональності енергоустановки та неприйнятним рівнем небезпеки для екіпажу.

Значення, наведені в табл. 1, отримано не як прямі статистичні частоти аварій, а як результат комбінованого сценарно-експертного оцінювання. Для кожного сценарію враховувалися: 1) тип і масштаб ініціувальної відмови; 2) просторове положення джерела витoku; 3) стан вентиляції; 4) наявність

та швидкодія газодетекції; 5) імовірність наявності джерела запалювання; 6) очікуваний масштаб теплового та функціонального ураження. На цій основі сценарію присвоювалися дискретні оцінки рівня імовірності та тяжкості наслідків за уніфікованими п’ятирівневими шкалами.

Першим базовим критерієм є умовна ймовірність займання суміші « H_2 –повітря» P_{ign} . Вона визначається досягненням концентрацій водню меж займистості у відповідних зонах машинного відділення, наявністю джерел запалювання та тривалістю їх одночасної дії. Для сценаріїв з мікровитоками (S1, S2) ключовим чинником є ефективність вентиляції та швидкість накопичення H_2 , тоді як для сценаріїв S3 і S4 вирішальну

Таблиця 1

Параметри сценаріїв для матриці ризику

Сценарій	Опис	Ймовірність до заходів P_b	Наслідки до заходів C_b	Ймовірність після заходів P_i	Наслідки після заходів C_i
S1	Мікровиток H_2 без займання	3	1	2	1
S2	Мікровиток з відкладеним займанням	2	3	1	2
S3	Масовий виток з негайним займанням	2	5	1	4
S4	Масовий виток при неефективній вентиляції	1	5	1	4

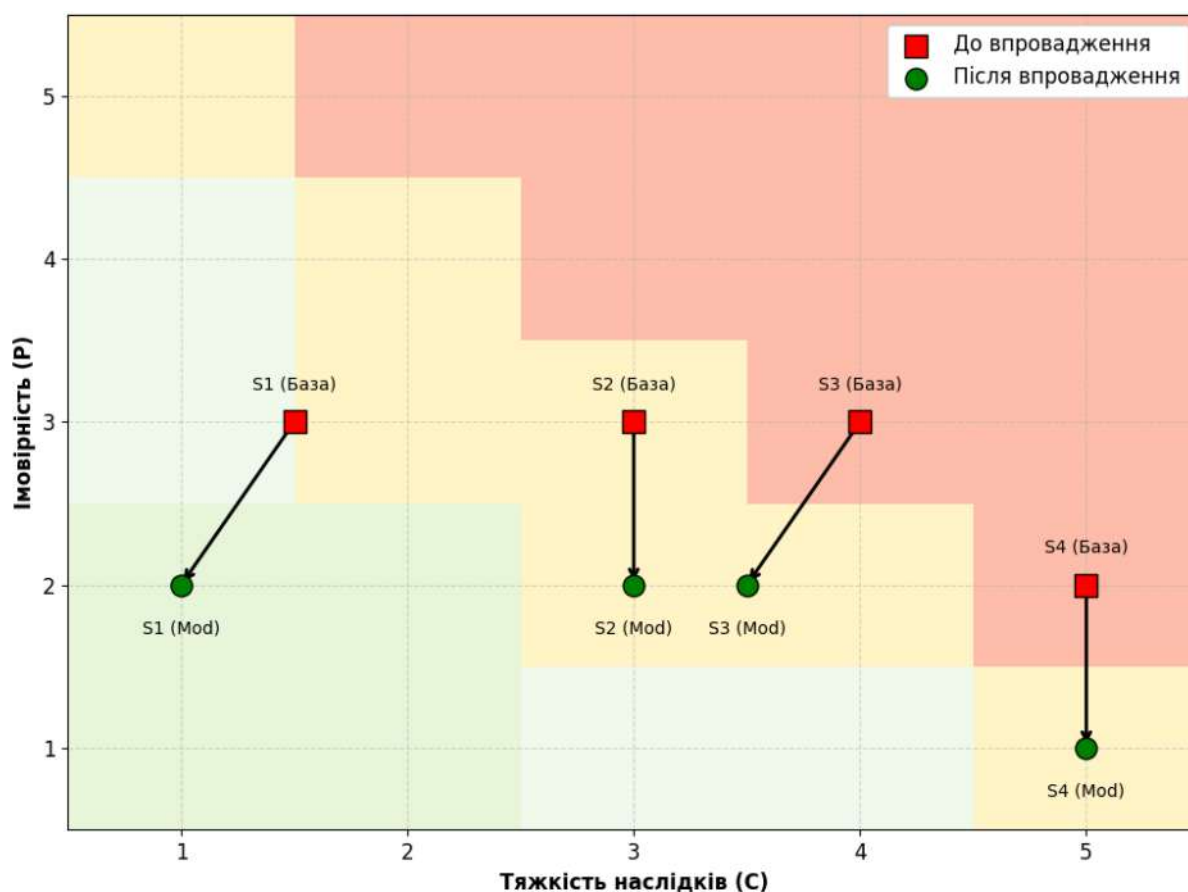


Рис. 4. Матриця ризику «ймовірність – наслідки» для базового та вдосконаленого варіантів системи захисту при сценаріях S1–S4

роль відіграє миттєва наявність відкритих гарячих поверхонь і електричних джерел іскроутворення, що узгоджується з підходами кількісної оцінки ризику водневих систем на судах [7, 9].

Другим критерієм виступає інтенсивність теплового потоку q'' , що діє на поверхні огорожувальних конструкцій, трубопроводів та елементів двигуна. Для факельних пожеж і об'ємного горіння водню тепловий вплив оцінюється як функція витрати газу, геометрії факела та відстані до поверхні, після чого порівнюється з критичними рівнями, за яких відбувається втрата несучої здатності сталевих конструкцій, деградація теплоізоляції або виникає ризик вторинного займання дизельного палива й мастила [3, 4].

Важливим часовим показником є час досягнення граничної температури τ_T у контрольному перерізі конструкції, який характеризує запас її вогнестійкості та зіставляється з тривалістю пожежного впливу для відповідного сценарію. Якщо τ_T перевищує час, необхідний для аварійного відключення подачі водню та реагування екіпажу, конструкція вважається такою, що забезпечує прийнятний рівень безпеки. Окремо розглядається час збереження функціональності критичних систем t_{func} (вентиляції, електроживлення, систем керування та сигналізації), оскільки їх працездатність є ключовою умовою ефективної локалізації аварії [1, 2].

Зазначені критерії формують кількісну основу для подальшого узагальнення результатів сценарного аналізу та побудови матриць ризику й інтегрального показника пожежної небезпеки. Їх використання дозволяє перейти від оцінювання окремих небезпечних факторів до системного порівняння різних конфігурацій судових енергоустановок у двопаливному режимі з позицій пожежної безпеки [7, 8].

Узагальнена методика ризик-орієнтованої оцінки пожежної безпеки. З урахуванням сформованих пожежонебезпечних сценаріїв S1–S4 та визначеної системи кількісних критеріїв у роботі розроблено узагальнену методику ризик-орієнтованої оцінки пожежної безпеки судових енергоустановок у двопаливному режимі «дизель – водень». Методика спрямована на перехід від якісних експертних суджень до кількісно обґрунтованого порівняння різних конфігурацій СЕУ та технічних рішень з інтеграції водню.

Ключовим елементом методики є поєднання імовірнісної оцінки реалізації сценаріїв із детермінованою оцінкою їх наслідків. Для кожного сценарію S_i визначається умовна ймовірність P_i , яка враховує частоту можливих відмов елементів водневої підсистеми, ефективність вентиляції,

чутливість і швидкодію систем газодетекції, а також наявність потенційних джерел запалювання. Наслідки C_i нормуються за шкалою, що відображає ступінь ураження огорожувальних конструкцій, втрату функціональності критичних систем і рівень загрози для екіпажу.

На цьому етапі дослідження оцінювання імовірності реалізації сценаріїв S1–S4 здійснюється за комбінованим сценарно-експертним підходом, оскільки репрезентативні статистичні масиви саме для судових дизельних енергоустановок із мікродомішкою водню є обмеженими. Формування оцінок виконується послідовно у чотири етапи.

На першому етапі для кожного сценарію ідентифікуються ініціювальні події: порушення герметичності з'єднань, локальна відмова арматури або трубопроводу, недостатня ефективність вентиляції, затримка спрацювання газодетекції, наявність джерела запалювання.

На другому етапі оцінюється вплив захисних бар'єрів, до яких віднесено вентиляцію, газоаналіз, відсічну арматуру, теплове екранування та алгоритми аварійного відключення.

На третьому етапі для сценарію виконується експертне ранжування за п'ятирівневою шкалою імовірності залежно від поєднання ініціювальних подій та стану захисних бар'єрів.

На четвертому етапі отримана дискретна оцінка P використовується в матриці ризику та в інтегральному показнику пожежної небезпеки.

Таким чином, значення P у Таблиці 1 слід трактувати як результат формалізованого експертного оцінювання, узгодженого з фізикою процесу витоку, накопичення і займання водню, а не як прямі частотні статистичні оцінки аварій. (Майбутні дослідження передбачають калібрування шкали на основі даних експлуатації).

На першому етапі методики виконується сценарна ідентифікація небезпек для конкретної компоновки машинного відділення та схеми подачі водню. Далі для кожного сценарію здійснюється оцінка теплового впливу, часу досягнення граничних температур і часу збереження функціональності систем безпеки. Отримані дані використовуються для заповнення матриці ризику в координатах «ймовірність – наслідки», що дозволяє виявити сценарії з неприйнятним або умовно прийнятним рівнем ризику.

Для інтегральної оцінки пожежної небезпеки вводиться узагальнений показник I_{five} , який визначається як зважена сума добутоків імовірностей та наслідків для всіх сценаріїв. Вагові коефіцієнти обираються з урахуванням пріоритетів цивільного захисту та специфіки експлуатації судна. Такий підхід дає змогу порівнювати базову дизельну

СЕУ, двопаливну установку без спеціальних заходів та варіанти з оптимізованими конструктивно-технологічними рішеннями.

Запропонована методика є універсальною з точки зору застосування: вона може бути адаптована як на етапі проектування нових суден, так і при оцінюванні пожежної безпеки модернізованих існуючих СЕУ. Її використання дозволяє обґрунтовано приймати рішення щодо доцільності впровадження водневих технологій з позицій пожежної безпеки та цивільного захисту.

Конструктивно-технологічні бар'єри та кількісна ризик-орієнтована оцінка пожежної безпеки СЕУ в режимі «дизель–Н₂». Пожежна безпека двопаливної суднової енергоустановки визначається сукупністю пасивних (конструктивних) і активних (технологічних) бар'єрів, а також їх відображенням у кількісній оцінці ризику для сценаріїв S1–S4. На відміну від традиційної дизельної СЕУ, інтеграція водню додає джерело горючого газу з високою дифузійною здатністю та широкими межами займистості, що вимагає перегляду компоновки машинного відділення й логіки захисту. До ключових конструктивних рішень належать:

1) розміщення агрегатів виробництва/буферного зберігання Н₂ поза машинним відділенням або в ізольованих відсіках для мінімізації накопичення газу у верхніх зонах та контакту з гарячими поверхнями;

2) раціональне трасування трубопроводів переважно у «холодних» зонах із мінімізацією фланцевих з'єднань та локальним екрануванням у місцях перетину з високотемпературними ділянками;

3) застосування вогнестійких перегородок і теплових екранів, що збільшують час досягнення граничних температур і зменшують ризик вторинного займання рідких горючих (палива/мастила).

Оптимальна компоновка досягається поєднанням просторового розділення, скороченням «слабких місць» (арматура/стикування) та цільовим тепловим захистом.

Активний контур безпеки формується технологічними рішеннями та алгоритмами керування. В умовах використання Н₂ традиційна вентиляція, орієнтована на тепловідвід, часто є недостатньою; пріоритетом стає видалення водню з верхніх зон і локальних «кишень» через комбіновану загальнообмінну та локальну витяжну вентиляцію, що знижує імовірність сценаріїв накопичення і відкладеного займання (S2, S4). Газодетекція повинна бути зосереджена в зонах потенційного витоку та верхній частині відсіку; застосування

двопорогової логіки (попередження/аварія) забезпечує градуйовану реакцію – від корекції подачі до повного відсічення Н₂. Вентиляція, детекція та виконавчі органи інтегруються алгоритмами аварійних блокувань: автоматичне зниження/відсічення подачі, зупинка електролізера, переведення двигуна на чистий дизель, активація аварійної вентиляції – усе це скорочує тривалість дії небезпечних факторів і підвищує ймовірність збереження працездатності критичних систем.

Для формалізованого порівняння рівнів безпеки застосовується кількісна ризик-орієнтована процедура за сценаріями S1–S4 з оцінюванням ймовірності реалізації P_i та наслідків C_i . Ймовірність враховує частоту відмов елементів водневої підсистеми, ефективність вентиляції та швидкодію газодетекції; наслідки – ступінь теплового ураження огорожувальних конструкцій, втрату функціональності критичних систем і загрозу екіпажу. Оцінювання виконується за дискретними шкалами (1–5) для базового та вдосконаленого станів системи захисту, а ризик для сценарію визначається як

$$R_i = P_i \cdot C_i.$$

Зведення результатів у матрицю «ймовірність–наслідки» дає змогу виявити сценарії, що формують неприйнятні рівні ризику (як правило, S2–S4 без спеціальних заходів), та кількісно показати ефект впроваджених бар'єрів через зниження P_i і C_i і відповідне зміщення до зон керованого/прийняттого ризику.

Інтегральний показник пожежної небезпеки та порівняння конфігурацій СЕУ. Для узагальнення результатів сценарного та ризик-орієнтованого аналізу доцільно перейти від окремих оцінок R_i до інтегрального показника пожежної небезпеки суднової енергоустановки. Такий показник дозволяє зіставляти різні конфігурації СЕУ, враховуючи сукупний вплив усіх релевантних сценаріїв пожежі та вибухопожежної небезпеки при використанні водню.

$$S_i = \alpha_1 S_{th,i} + \alpha_2 S_{fn,i} + \alpha_3 S_{cr,i}$$

де:

- $S_{th,i}$ – бальна оцінка термічного ураження конструкцій;
- $S_{fn,i}$ – бальна оцінка втрати функціональності критичних систем;
- $S_{cr,i}$ – бальна оцінка загрози для екіпажу;

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1.$$

Інтегральний показник пожежної небезпеки пропонується визначати у вигляді зваженої суми ризиків для окремих сценаріїв:

$$I_{\text{fire}} = \sum_{i=1}^4 w_i P_i C_i,$$

А для інтегрального показника:

$$I_F = \sum_{i=1}^4 W_{E,i} P_i S_i,$$

де P_i – імовірність реалізації сценарію S_i , C_i – нормована оцінка тяжкості наслідків, w_i – ваговий коефіцієнт, що відображає відносну значущість сценарію з точки зору цивільного захисту та безпеки експлуатації судна. Вагові коефіцієнти обираються з урахуванням потенційного ураження екіпажу, масштабів можливих конструктивних пошкоджень та імовірності втрати функціональності СЕУ. Результати інтегральної оцінки пожежної небезпеки для трьох конфігурацій наведено в табл. 2; їх графічне порівняння подано на рис. 5. При призначенні вагових коефіцієнтів w_i використано принцип відносної значущості сценарію за трьома критеріями:

1. потенційний рівень небезпеки для екіпажу;
2. очікуваний масштаб термічних і конструктивних пошкоджень;
3. імовірність втрати працездатності критичних підсистем СЕУ.

Сценарії, що поєднують значну загрозу для персоналу з можливістю розвитку тяжких пошкоджень і функціональної дестабілізації установки, отримують вищі значення w_i . Відповідно, для сценаріїв локального мікротоку без займання вагові коефіцієнти приймаються меншими, ніж для сценаріїв масованого витоку з займанням або неефективною вентиляцією.

Перевірка чутливості показала, що при варіюванні вагових коефіцієнтів у межах $\pm 15\%$ від базових значень абсолютні величини інтегрального показника змінюються, однак якісне

співвідношення між базовою дизельною СЕУ, двопаливною СЕУ без додаткових заходів і двопаливною СЕУ з оптимізованими заходами залишається незмінним. Це свідчить про стійкість висновку щодо підвищеного ризику для неадаптованої двопаливної конфігурації та ефективності запропонованих захисних рішень.

Таблиця 2

Інтегральний показник пожежної небезпеки для різних конфігурацій СЕУ

Конфігурація	Інтегральний показник пожежної небезпеки I_{fire}
Базова дизельна СЕУ	12
Двопаливна СЕУ без додаткових заходів	28,5
Двопаливна СЕУ з оптимізованими заходами	14,2

Запропонований показник використано для порівняння трьох характерних конфігурацій суднової енергоустановки. Перша конфігурація відповідає традиційній дизельній СЕУ без використання водню, де пожежний ризик формується переважно витоками рідкого палива, мастила та нагрівом вихлопних систем. Друга конфігурація – двопаливна СЕУ без спеціальних конструктивно-технологічних заходів – характеризується появою додаткових сценаріїв, пов'язаних із витоками та займанням H_2 , що призводить до зростання інтегрального показника пожежної небезпеки. Третя конфігурація включає оптимізовані рішення щодо розміщення водневого обладнання, трасування трубопроводів, теплового екранування, вентиляції, газодетекції та алгоритмів керування. Порівняльний аналіз показує, що для двопаливної СЕУ

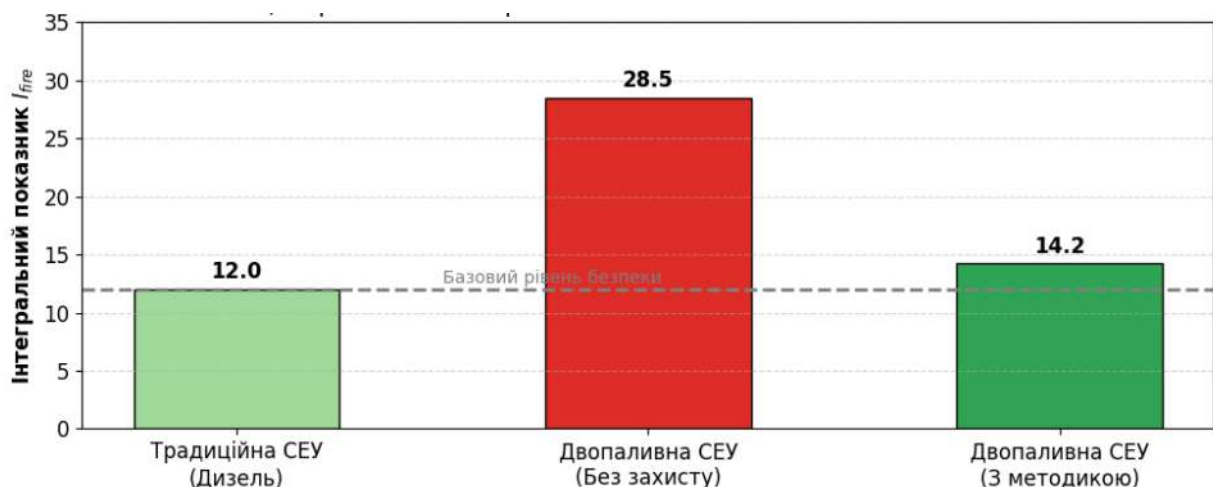


Рис. 5. Порівняння інтегрального показника пожежної небезпеки для трьох конфігурацій: базова дизельна СЕУ, двопаливна СЕУ без додаткових заходів, двопаливна СЕУ з оптимізованими конструктивно-технологічними рішеннями

без додаткових заходів значення I_{fire} суттєво перевищує відповідний показник для базової дизельної установки. Водночас впровадження комплексу конструктивних і технологічних рішень дозволяє знизити інтегральний показник до рівня, близького до традиційної СЕУ, або до значень, які можуть бути класифіковані як прийнятні з позицій сучасних підходів до цивільного захисту.

Таким чином, інтегральний показник пожежної небезпеки є ефективним інструментом для кількісного обґрунтування доцільності використання водню в суднових енергоустановках і вибору раціональних технічних рішень з урахуванням вимог пожежної безпеки.

Запропонована методика має визначені межі застосування. У поточній редакції вона орієнтована на суднові дизельні енергоустановки, в яких водень використовується як мала домішка до дизельного палива, орієнтовно до 0,1 % за масою, з подачею у паливопровід високого тиску перед форсункою. Методика призначена для етапів концептуального проектування, порівняльного аналізу варіантів компоновки та оцінювання ефективності захисних заходів у машинному відділенні. Її безпосереднє застосування до установок з високими частками заміщення дизельного палива воднем, до систем зі значними запасами стисненого або криогенного водню, а також до інших архітектур подачі H_2 потребує додаткового уточнення сценаріїв, шкал імовірності та критеріїв наслідків. Отже, одержані результати не слід некритично поширювати на всі типи суден і всі варіанти водневих енергетичних систем.

Обговорення результатів та зіставлення з існуючими дослідженнями. Отримані результати дозволяють розширити наявні уявлення про пожежну безпеку водневих енергетичних систем у морській галузі та уточнити специфіку двопаливного режиму «дизель – водень» у складі традиційної суднової енергоустановки. На відміну від більшості публікацій, зосереджених на показниках ефективності та екологічності згорання, у даній роботі акцент зроблено на інтеграції теплових, газодинамічних і конструктивних факторів у єдину ризик-орієнтовану рамку пожежної безпеки. Порівняння з CFD-дослідженнями витоків водню в машинних відділеннях суден показує, що виявлені критичні зони накопичення H_2 узгоджуються з результатами чисельного моделювання, наведеними в літературі. Водночас у більшості наявних робіт вихідною умовою є використання водню як основного палива або у складі паливних елементів, тоді як у двопаливному дизель- H_2 режимі характер небезпеки суттєво відрізняється. Малі домішки водню не формують великих

об'ємів горючої суміші у впускних трактах, але створюють локалізовані ризики в зоні генерації, транспортування та дозування газу. Отримані сценарії S1–S4 та побудована матриця ризику доповнюють існуючі ризик-орієнтовані підходи, засновані на bow-tie моделях і Байєсівських мережах, за рахунок явного врахування вогнестійкості конструкцій і часу досягнення граничних температур. Це дозволяє перейти від абстрактної оцінки «частота – наслідки» до інженерно обґрунтованого аналізу здатності суднової енергоустановки зберігати цілісність і функціональність під час пожежі.

Важливою відмінністю запропонованого підходу є інтеграція активних і пасивних заходів захисту. Результати показують, що оптимізація лише алгоритмів керування та вентиляції без належного конструктивного захисту не забезпечує достатнього зниження ризику для сценаріїв з інтенсивним тепловим впливом. Водночас поєднання теплових екранів, раціонального трасування трубопроводів і швидкодійної газодетекції дає синергійний ефект, який не фіксується у більшості попередніх досліджень.

Таким чином, робота демонструє, що пожежна безпека двопаливних суднових енергоустановок потребує окремого методичного підходу, відмінного як від традиційних дизельних систем, так і від повністю водневих енергетичних установок, що є її основним науковим внеском.

Висновки та практичне значення дослідження. Встановлено, що пожежна небезпека суднових енергоустановок у двопаливному режимі «дизель – водень» визначається насамперед просторовою організацією водневої підсистеми, характером можливих витоків та ефективністю пасивних і активних засобів захисту, а не безпосередньо часткою водню в паливі. Найбільш критичними є сценарії масованих витоків H_2 за умов неефективної вентиляції машинного відділення.

Запропоновано сценарійний підхід до аналізу пожежної небезпеки, що охоплює аварійні ситуації S1–S4 і дозволяє формалізувати як імовірність займання, так і тяжкість теплового впливу з урахуванням запасу вогнестійкості елементів суднової енергоустановки. Обґрунтовано систему кількісних критеріїв оцінювання, яка включає імовірність займання, інтенсивність теплового потоку, час досягнення граничних температур та час збереження функціональності критичних систем.

Розроблено ризик-орієнтовану методику оцінки пожежної безпеки на основі матриці «ймовірність – наслідки» та інтегрального показника пожежної небезпеки I_{fire} . Показано, що впровадження водню без спеціальних

конструктивно-технологічних заходів призводить до зростання інтегрального ризику, тоді як комплексна оптимізація дозволяє знизити його до рівня, порівнянного з традиційною дизельною СЕУ.

Встановлено, що найбільший внесок у підвищення пожежної безпеки забезпечують просторове розділення водневого обладнання і зон інтенсивного тепловиділення, раціональне трасування трубопроводів у «холодних» зонах та застосування вогнестійких перегородок і локальних теплових екранів, впровадження комплексу заходів (екранування + активна вентиляція) дозволило знизити інтегральний показник пожежного ризику I_{fire} на 50.1 % (з 28.5 до 14.2 балів). Практичне значення результатів полягає в можливості використання запропонованої методики під час проектування й модернізації СЕУ та при обґрунтуванні прийняттого рівня пожежного ризику органами цивільного захисту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. International Maritime Organization. *Interim recommendations for carriage of liquefied hydrogen in bulk*: Resolution MSC.420(97). London : IMO, 2016.
2. International Maritime Organization. *International Code of Safety for Ships using Gases or other Low-flashpoint Fuels (IGF Code)*. London : IMO, 2017.
3. ISO/TR 15916:2015. *Basic considerations for the safety of hydrogen systems*. Geneva : International Organization for Standardization, 2015.
4. DNV GL. *Handbook for hydrogen-fuelled vessels*. Høvik : DNV GL, 2021. 132 p.
5. Shalapko D., Radchenko M., Pavlenko A., Radchenko R., Radchenko A., Pyrysunko M. Advanced fuel system with gaseous hydrogen additives // *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*. 2024. Vol. 72, no. 2. Art. no. e148837. DOI: 10.24425/bpasts.2024.148837
6. Shalapko D. O. Investigation of the influence of the use of small hydrogen impurities to the main fuel on injection spraying = Дослідження впливу використання малих добавок водню до основного палива на розпилювання дизельною форсункою. *Збірник наукових праць НУК*. 2021. № 4 (487). С. 14–19. DOI: 10.15589/znp2021.4(487).3
7. Aarskog F. G., Rødseth H., Scheidl S. [та ін.] Concept risk assessment of a hydrogen-driven high-speed passenger ferry. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020. Vol. 45, iss. 2. P. 1359–1373. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.10.224
8. Mao X., Zhang D., Li H. [та ін.] Risk assessment of hydrogen fuel cell ships based on fuzzy Bayesian network. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 270. Art. 113636. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.113636.
9. Choi J.-H., Lee D., Park B.-J. Quantitative risk assessment of hydrogen leakage in a fuel cell ship.

Journal of Marine Science and Engineering. 2023. Vol. 11, iss. 4. Art. 844. DOI: 10.3390/jmse11040844

10. Van Hoecke L., Laffineur L., Campe R. [та ін.] Challenges in the use of hydrogen for maritime applications. *Energy & Environmental Science*. 2021. Vol. 14. P. 815–843. DOI: 10.1039/D0EE03078A

11. Dimitriou P., Tsujimura T. A review of hydrogen as a compression ignition engine fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. Vol. 42, iss. 38. P. 24470–24486. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.07.232

12. Yip H. L., Srna A., Yuen A. C. Y. [та ін.] A review of hydrogen direct injection for internal combustion engines: Towards carbon-free combustion. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9, iss. 22. Art. 4842. DOI: 10.3390/app9224842

13. Zhu L., Zhang W., Liu W. [та ін.] Experimental study on combustion and emission characteristics of a hydrogen-enriched marine diesel engine. *Fuel*. 2022. Vol. 315. Art. 123236. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.123236

REFERENCES

1. International Maritime Organization. (2016). *Interim recommendations for carriage of liquefied hydrogen in bulk* (Resolution MSC.420(97)). IMO.
2. International Maritime Organization. (2017). *International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low-Flashpoint Fuels (IGF Code)*. IMO.
3. International Organization for Standardization. (2015). *ISO/TR 15916:2015 – Basic considerations for the safety of hydrogen systems*. ISO.
4. DNV GL. (2021). *Handbook for hydrogen-fuelled vessels*. DNV GL.
5. Shalapko, D., Radchenko, M., Pavlenko, A., Radchenko, R., Radchenko, A., & Pyrysunko, M. (2024). Advanced fuel system with gaseous hydrogen additives. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 72(2), Article e148837. <https://doi.org/10.24425/bpasts.2024.148837>
6. Shalapko, D. O. (2021). Investigation of the influence of the use of small hydrogen impurities to the main fuel on injection spraying. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universytetu korablebuduvannia imeni adm. Makarova (Collection of Scientific Papers of Admiral Makarov National University of Shipbuilding)*, (4), 14–19. [https://doi.org/10.15589/znp2021.4\(487\).3](https://doi.org/10.15589/znp2021.4(487).3) [in Ukrainian]
7. Aarskog, F. G., Rødseth, H., Scheidl, S., et al. (2020). Concept risk assessment of a hydrogen-driven high-speed passenger ferry. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(2), 1359–1373. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.224>
8. Mao, X., Zhang, D., Li, H., et al. (2023). Risk assessment of hydrogen fuel cell ships based on fuzzy Bayesian network. *Ocean Engineering*, 270, 113636. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113636>
9. Choi, J.-H., Lee, D., & Park, B.-J. (2023). Quantitative risk assessment of hydrogen leakage in a fuel cell ship. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(4), 844. <https://doi.org/10.3390/jmse11040844>

10. Van Hoecke, L., Laffineur, L., Campe, R., et al. (2021). Challenges in the use of hydrogen for maritime applications. *Energy & Environmental Science*, 14, 815–843. <https://doi.org/10.1039/D0EE03078A>

11. Dimitriou, P., & Tsujimura, T. (2017). A review of hydrogen as a compression ignition engine fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(38), 24470–24486. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.232>

12. Yip, H. L., Srna, A., Yuen, A. C. Y., et al. (2019). A review of hydrogen direct injection for internal combustion engines: Towards carbon-free combustion. *Applied Sciences*, 9(22), 4842. <https://doi.org/10.3390/app9224842>

13. Zhu, L., Zhang, W., Liu, W., et al. (2022). Experimental study on combustion and emission characteristics of a hydrogen-enriched marine diesel engine. *Fuel*, 315, 123236. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123236>

© Д. О. Шалапко, Н. В. Гречка

Науково-методична стаття

Дата першого надходження статті до видання: 14.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.48.2026.16>

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

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8444-2006> – О. В. Шаповалов

<http://orcid.org/0000-0001-5278-3754> – С. Я. Вовк

<http://orcid.org/0000-0002-6946-8395> – А. П. Кушнір

<http://orcid.org/0000-0003-3139-0921> – Н. О. Ференц

✉ o1972@ukr.net

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ПОВІТРООБМІНУ НА УТВОРЕННЯ НЕБЕЗПЕЧНИХ ЧИННИКІВ ПОЖЕЖІ В ПРИМІЩЕННІ КВАРТИРИ ВИСОТНОГО ЖИТЛОВОГО БУДИНКУ

Проблема. Урбанізаційні процеси у багатьох регіонах України призвели до міграції населення та суттєвого зростання чисельності мешканців міських населених пунктів. Особливо відчутними ці тенденції стали у західних регіонів України, що значною мірою зумовлено наслідками повномасштабне вторгнення росії. Самостійне переселення громадян, примусова евакуація населення та релокація підприємств у більш безпечні регіони спричинило збільшення активності будівельних робіт з метою забезпечення житлом усіх громадян, які його потребують.

Індивідуальні архітектурні рішення та поєднання різноманітних конструктивних елементів у будівництві висотних житлових будинків, а також вплив людського фактору суттєво впливають на безпеку проживання. У разі виникнення пожежі ці фактори можуть зумовлювати складність прогнозування розвитку небезпечних чинників пожежі та їхнього впливу на людей.

Мета. Проведення аналізу динаміки зміни параметрів небезпечних чинників пожежі, що утворюються в квартирі житлового будинку з змінними параметрами обміну повітряних мас пов'язаних з різним положенням стулки вікна та часу настання їх критичних значень що впливає на безпеку евакуації людей.

Методи дослідження. У роботі використано метод математичного моделювання за допомогою програмного комплексу Fire Dynamics Simulator (FDS) процесів утворення і розповсюдження небезпечних чинників пожежі (CO_2 , CO , $^\circ\text{C}$, видимість).

Основні результати дослідження. На настання граничних значень небезпечних чинників пожежі впливає не тільки висота, на якій відбувався контроль вказаних значень, а й повітрообмін, який присутній на момент пожежі. Так значення видимості досягає критичних значень на всіх контрольованих висотах при повністю закритих вікнах і зовсім не настає при повністю відкритих вікнах. Небезпечно для життя значення температури настає при повністю закритих вікнах тільки на великих висотах, а при повністю відкритому вікні зовсім не настає. Небезпечні концентрації двооксиду вуглецю і монооксиду вуглею, не настає у жодному сценарії розвитку пожежі.

Висновки. Аналіз комп'ютерного моделювання в програмного комплексу FDS PyroSim показав, що визначальними чинниками пожежі, які можуть вплинути на безпеку евакуування людей є видимість і температура. При пожежі в приміщенні кухні, видимість та температура досягає граничних значень тільки у приміщенні передпокою 1. При зачиненому вікні в кухні граничне значення видимості на висоті 1,7 м настає на 118 с, а на висоті 0,4 м на 142 с. Граничне значення температури настає на висоті 1,7 м настає на 124 с. При відчиненій стулці вікна на 8° в приміщенні кухні граничні значення видимості та температури на висоті 1,7 м настає на 133 с. При повністю відчиненому вікні в кухні граничне значення видимості та температури не настає на жодній контрольованій висоті. Граничні значення концентрації CO і CO_2 не настають у всіх приміщеннях за будь яких умов, крім кухні.

Ключові слова: протипожежний захист, висотний будинок, небезпечні чинники пожежі, FDS, комп'ютерне моделювання.

MATHEMATICAL MODELING OF THE IMPACT OF AIR EXCHANGE ON THE FORMATION OF HAZARDOUS FIRE FACTORS IN THE APARTMENT OF A HIGH-RISE RESIDENTIAL BUILDING

The Problem. Urbanization processes in many regions of Ukraine have led to population migration and a significant increase in the number of residents in urban areas. These trends have been particularly pronounced in the western regions of Ukraine, largely due to the consequences of Russia's full-scale invasion. Voluntary relocation of citizens, forced evacuation of the population, and the relocation of businesses to safer regions have led to an increase in construction activity aimed at providing housing for all citizens in need.

Individual architectural solutions and the combination of various structural elements in the construction of high-rise residential buildings, as well as the human factor, significantly influence residential safety. In the event of a fire, these factors can make it difficult to predict the development of fire hazards and their impact on people.

Objective. To analyze the dynamics of changes in the parameters of hazardous fire factors generated in an apartment of a residential building with variable air exchange parameters associated with different window sash positions and the time at which their critical values are reached, which affects the safety of human evacuation.

Research methods. The study employs mathematical modeling using the Fire Dynamics Simulator (FDS) software package to simulate the formation and propagation of hazardous fire factors (CO₂, CO, °C, visibility).

Key findings of the study. The occurrence of critical levels of fire hazards is influenced not only by the height at which these levels were monitored, but also by the air exchange taking place at the time of the fire. Thus, visibility reaches critical levels at all monitored heights when windows are fully closed, and does not reach critical levels at all when windows are fully open. Life-threatening temperature levels occur with fully closed windows only at high altitudes, and do not occur at all with fully open windows. Dangerous concentrations of carbon dioxide and carbon monoxide do not occur in any fire development scenario.

Conclusions. Analysis of computer simulations using the FDS PyroSim software package showed that the determining factors of a fire that can affect the safety of evacuation are visibility and temperature. In the event of a fire in the kitchen, visibility and temperature reach critical values only in the hallway 1. With the kitchen window closed, the critical visibility value at a height of 1.7 m is reached at 118 seconds, and at a height of 0.4 m at 142 seconds. The critical temperature value is reached at a height of 1.7 m in 124 seconds. With the kitchen window sash open 8° into the room, the critical visibility and temperature values at a height of 1.7 m are reached in 133 seconds. With the kitchen window fully open, the limit values for visibility and temperature are not reached at any monitored height. The limit values for CO and CO₂ concentrations are not reached in any room under any conditions, except in the kitchen.

Key words: fire protection, high-rise building, fire hazard factors, FDS, computer modeling.

Постановка проблеми. Житловий фонд у деяких регіонах України розвивається швидкими темпами. У відповідь на потреби ринку забудовники реалізують сміливі проекти, які пов'язані з обмеженням площ земельних ділянок під забудову. Збільшується поверховість житлових будинків, набувають різноманітних форм конфігурації житлових помешкань, приміщень загального та комерційного призначення, збільшується довжина евакуаційних шляхів, деякі приміщення не мають природнього освітлення (вікон). Усе це впливає на безпеку людей, які в них проживають.

Аналіз статистичних даних свідчить про стійку тенденцію до збільшення кількості пожеж у житловому секторі. Станом на 1 січня 2026 з моменту повномасштабного вторгнення в Україні було зареєстровано 201211 випадок загорянь у житлових будинках [1].

Розвиток пожежі має непередбачуваний характер. На поширення небезпечних чинників пожежі

(диму, температури, токсичних газів) в просторі житлової квартири, а також в інших приміщеннях та на шляхах евакуації людей впливають конвективні потоки, які розповсюджуються у вертикальній і горизонтальній площинах.

Тому дослідження розподілу вказаних небезпечних чинників пожежі по висоті приміщення є актуальною проблемою. Її вирішення дасть можливість визначати зони накопичення небезпечних чинників та місця досягнення ними критичних значень, які створюють небезпеку для людей, а також знайти шляхи усунення вищезгаданих небезпек при плануванні помешкань будь-якої складності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема забезпечення пожежної безпеки у висотних житлових будинках перебуває в центрі уваги багатьох дослідників. Автори [3] провели аналіз небезпек висотних житлових будинків на прикладі будинків розташованих у Львові.

Спираючись на інформацію надану працівниками підрозділів Головного управління ДСНС України у Львівській області основними чинниками, які впливають на безпеку людей у житлових будівлях є невідповідність будівельних конструкцій нормованим межах вогнестійкості, неналежний захист металевих елементів будівель, недостатня кількість протипожежних дверей, люків, воріт та вікон, недостатня кількість або незадовільний стан шляхів евакуації (двері сходових кліток та ліфтових холів не обладнані пристроями для самозачинення та ущільненнями в притулах, мешканці житлових будинків самовільно проводять перепланування, влаштовуючи комірки, інші приміщення), відсутність евакуаційного освітлення, незабезпеченість об'єктів зовнішнім і внутрішнім протипожежним водопостачанням (не відремонтовані насоси підвищувачі тиску води, внутрішні пожежні крани не укомплектовані рукавами та стволами), непрацездатність системам автоматичної пожежної сигналізації (сигнали від приймальних приладів пожежної сигналізації не виведені на пульти централізованого спостереження), відсутність димовидалення та підпору повітря, оповіщення та управління евакуацією людей. Автори у своїй роботі зробили акцент на проблеми високіх пожежних ризиків у висотних та багатоповерхових житлових будинках та їх зниження шляхом визначення необхідної кількості спеціальної техніки для аварійно-рятувальних робіт та фінансування її придбання з метою забезпечення соціально-гарантованого рівня захисту населення від пожеж та інших надзвичайних ситуацій [3]. Однак, в даній роботі автори визначали пожежні ризики лише з точки зору забезпечення оперативно-рятувальних підрозділів спеціальною технікою за допомогою якої можна ефективно провести евакуацію людей та ліквідувати пожежу, але не врахували можливі впливи на людей небезпечних чинників пожежі, які можуть вплинути на їх самостійне евакуацію з будинку.

У роботі [4] проведено порівняння результатів моделювання пожежі у триповерховій житловій будівлі з результатами повномасштабних пожежних випробувань. Для визначення адекватності результатів моделювання температури при пожежі у приміщеннях із застосуванням комп'ютерної програми Rugsim були досліджені середні абсолютні відхилення, середні відносні відхилення, середні квадратичні відхилення показників термодинаміки для відповідних випробувань. Дослідження дало можливість визначити характер перебігу пожежі, часові залежності її основних параметрів та вплив температури на будівельні конструкції. Проте, в даній роботі автори розглянули лише один

небезпечний чинник пожежі, який може вплинути на безпеку людей при виникненні пожежі, – це температурний режим і не моделювали розвиток інших небезпечних чинників.

Дослідниками [5–7] розглянуто безпеку висотних будівель через розповсюдження вогню системою фасадного утеплення на основі пінополістиролу та можливість розповсюдження пожежі на інші поверхи і приміщення, що може створювати небезпеку для людей. Їх результати досліджень показали, що різна конструкція фасадів по різному впливає на розповсюдження вогню у вертикальній площині з утворенням різної кількості теплоти. Автори у своїх роботах не розглянули розповсюдження продуктів горіння, які містять небезпечні речовини, наявність яких може вплинути на безпеку евакуації з будівлі.

У роботі [8] створено модель розвитку пожежі в житловій квартирі, осередок якої знаходився в кухні. Дослідниками проаналізовано час розвитку пожежі, ступінь небезпеки, температуру та видимість. Також було проаналізовано архітектурні рішення, які можна було б розглянути для запобігання та розвитку пожежі в представлених ситуаціях. В процесі моделювання автори врахували лише два небезпечних чинники пожежі, не врахувавши інші небезпечні чинники, такі як утворення СО, зменшення концентрації O_2 , збільшення концентрації CO_2 , що також впливає на безпеку людей, які перебувають в будівлі.

У роботі [9] досліджено розповсюдження небезпечних чинників пожежі, яка виникла в приміщенні кухні квартири висотного житлового будинку за трьома сценаріями. Граничні значення небезпечних чинників пожежі приведено в [10]. Сценарії розвитку пожежі передбачали зміну швидкості вітру ззовні будівлі при повністю відчиненій і повністю зачиненій стулці вікна в приміщенні кухні. Результати дослідження показали, що швидкість вітру ззовні будівлі впливає на утворення небезпечних чинників пожежі. Однак, авторами не досліджено утворення і розповсюдження небезпечних чинників пожежі у безвітряну погоду і при всіх можливих положеннях стулки вікна.

У роботі [11] автори дослідили вплив небезпечних чинників пожежі, які утворюються під час пожежі в цеху паперової фабрики. Дослідження показали, що найбільш небезпечною стадією пожежі є в період триває від 5 до 30 хвилин. А максимальний час евакуації з усіх виробничих приміщень становитиме 190 секунд. Авторами встановлено, що найнебезпечнішим фактором пожежі на вказаному підприємстві, де питоме пожежне навантаження перевищує 500 МДж/м^2 є втрата видимості, яка настає після 331 секунди.

Однак, вказані результати дослідження не можна застосувати до приміщень висотного житлового будинку.

В роботі [12] автори розробили «критичний час пожежі» та обґрунтували інженерний спосіб розрахунку часу евакуації людей до моменту впливу небезпечних чинників пожежі, таких як полум'я та іскри, знижена концентрація кисню, токсичність продуктів горіння та термічного розкладання, дим, підвищена температура у приміщенні лакової та фарбувальної дільниці. Свої розрахунки вони підтвердили математичним моделюванням із застосуванням FDS. В інженерному розрахунку «критичного часу пожежі» автори не врахували час утворення критичних значень інших небезпечних чинників пожежі, таких як CO, CO₂, видимість, які можуть вплинути на безпечну евакуацію людей.

Автори [13] дослідили температурні характеристики пожежі у підвальному приміщенні житлового будинку та вплив дрібнорозпиленої води на їх граничні значення. Дослідженням було встановлено, що у підвальному приміщенні при вільному розвитку пожежі через 7 хв. досягається максимальна температура, яка становить 600–800 °С. Значення температури, яка небезпечна для людини, настає через близько 30 с. Застосування дрібнорозпиленої води дає можливість зменшити максимальну температуру в приміщенні об'ємом 12 м³ на 300–350 °С впродовж 2–3 хвилин. Повторна подача дрібнорозпиленої води впродовж 2 хвилин дала змогу знизити температуру до 100 °С. Автори у своїй роботі передбачають утворення дрібнорозпиленої води за допомогою ствола-пробійника і пропонують його застосовувати для ліквідації пожежі оперативно-рятувальними підрозділами. Однак, автори не дослідили вплив дрібнорозпиленої води на збільшення параметру видимості та застосування вказаної води з використанням стаціонарного обладнання для забезпечення безпеки евакуування людей з першого та вищих поверхів житлової будівлі.

У роботі [14] розглянуто вплив природної вентиляції на поширення диму, показана її роль у формуванні умов для евакуації людей при пожежі. Для досягнення поставленої мети автори проаналізували масив даних, отриманих за результатами 140 числових симуляцій у PyroSim (FDS), які враховували різні сценарії виникнення пожеж у житлових приміщеннях із змінними площами відкритих дверей (0–2 м²) і вікон (0–2,5 м²), відстані від осередку до евакуаційного виходу та форму поширення вогню (90, 180, 360°). Автори встановили, що відстань до евакуаційного виходу є вирішальним параметром блокування евакуаційних

виходів, тоді як форма пожежі та вентиляція мають менший, але також значний вплив. У своїх дослідженнях автори не врахували вплив повітрообміну в результаті природної вентиляції через віконні отвори при стандартних (фіксованих) положеннях стулки металопластикового вікна, а також не визначили значення небезпечних чинників пожежі – температури, CO, CO₂.

Мета. Проведення аналізу динаміки зміни параметрів небезпечних чинників пожежі, що утворюються в квартирі житлового будинку з змінними параметрами обміну повітряних мас пов'язаних з різним положенням стулки вікна та часу настання їх критичних значень, що впливає на безпеку евакуації людей.

Виклад основного матеріалу. З метою проведення чисельного моделювання розповсюдження небезпечних чинників, які можуть вплинути на безпеку евакуування мешканців житлового будинку, за допомогою програмного забезпечення Fire Dynamics Simulator (FDS), було обрано введений в експлуатацію висотний житловий будинок розташований у м. Львів (рис. 1), як об'єкт для подальших досліджень.



Рис. 1. Загальний вигляд житлового будинку у м. Львові

Житлова будівля має 22 поверхи та підземний паркінг. Перший і другий поверхи займають приміщення загального користування. З третього до останнього поверху розташовуються житлові квартири з висотою до стелі 2,7 м. Огороджувальні конструкції стін і перегородок виконані

у відповідності до [15]. Світлопрозорі огорожувальні конструкції виконані з одинарного склопакета у п'ятикамерному профілі. У кімнатах, в кухні, на балконі та у передпокоях, розміщено давачі небезпечних чинників пожежі, а саме монооксида вуглецю, двооксида вуглецю, температури і видимості. Вказані давачі згруповані в блоки давачів (БД) (розміщені один біля одного – «в одній точці площі приміщення») на розташовані на висотах 0,4 м і 1,7 м від підлоги. Висоти розміщення БД відповідають зросту дитини і дорослої людини відповідно до [10].

Планування приміщень житлової квартири, місця розміщення давачів, за допомогою яких визначаються значення параметрів небезпечних чинників пожежі під час чисельного моделювання і осередок пожежі, показано на рис. 2.

Моделювання розвитку пожежі, а також утворення і розповсюдження небезпечних чинників пожежі в FDS проводилось при наступних початкових умовах. Пожежа виникає в приміщенні кухні розмірами в плані 4 × 2,5 м, матеріал стін: цегла, перекриття залізобетон, вікна металопластикові. Джерело вогню – квадратна плита 0.5 × 0.5 м, потужністю 200 кВт, що відповідає горінню меблів та паперу, температура в приміщеннях квартири 20 °С, відносна вологість 40 %, атмосферний тиск 101 325 Па. Тривалість моделювання розвитку пожежі становить 180 секунд,

що відповідає першому етапу розвитку пожежі (1–3 хв).

Через приміщення передпокою проходить шлях евакуації людей з кімнат за межі квартири. Тому утворення критичних значень небезпечних чинників пожежі в цьому приміщенні може обмежити можливість евакуації з квартири.

Під час моделювання розглядалось три сценарії умов утворення і розповсюдження небезпечних чинників пожежі. Перший сценарій передбачав повністю зачинені всі вікна в квартирі при всіх відчинених міжкімнатних дверях. Другий сценарій передбачав відчинене вікно в приміщенні кухні в положенні провітрювання, при якому стулка вікна відхилена на кут 8 °С при всіх відчинених міжкімнатних дверях. Третій сценарій передбачав повністю відчинену стулку вікна в приміщенні кухні при всіх відчинених міжкімнатних дверях. Криві залежностей змін значень небезпечних чинників пожежі апроксимовані 20-ти кратним лінійним фільтром.

На (рис. 3) показана залежність тепловиділення (HRR) від тривалості пожежі при різних положеннях ступок вікна.

Аналіз отриманих результатів показує, що після короткочасної початкової фази розвитку пожежі тепловиділення різко зростає і впродовж перших секунд досягає квазістаціонарного рівня. У подальшому для всіх розглянутих вентиляційних

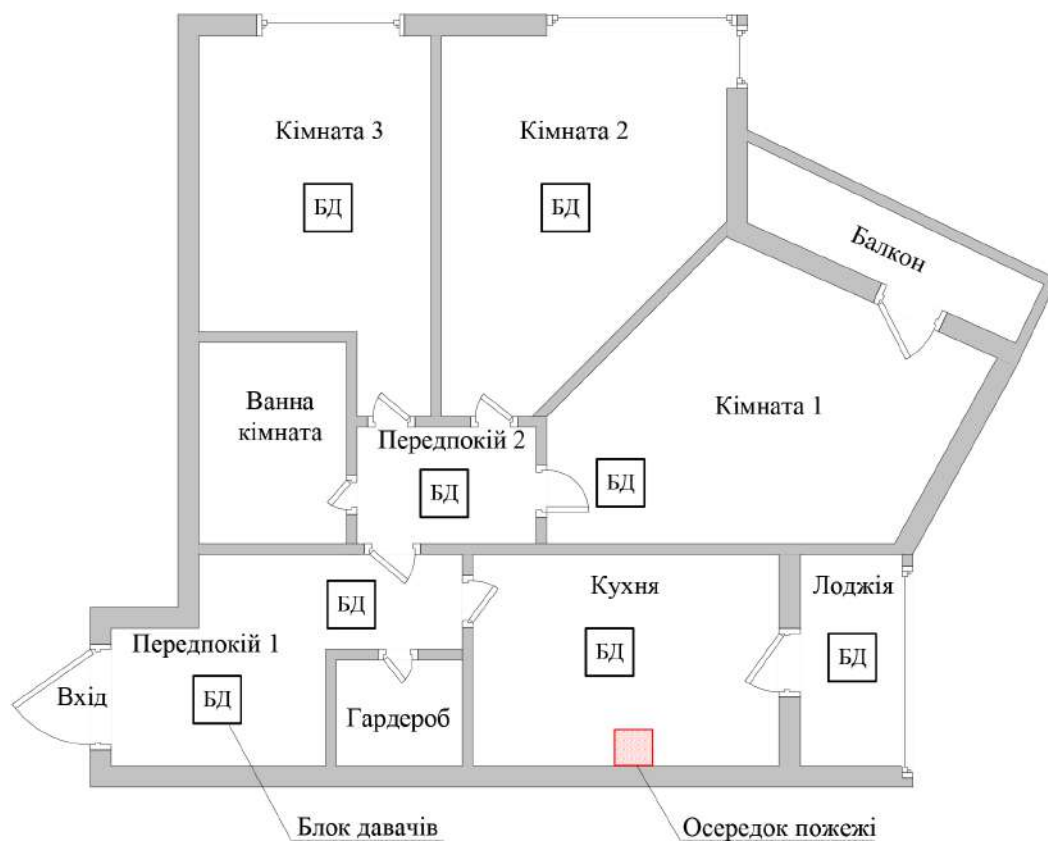


Рис. 2. План житлової квартири та місця розміщення блоків давачів

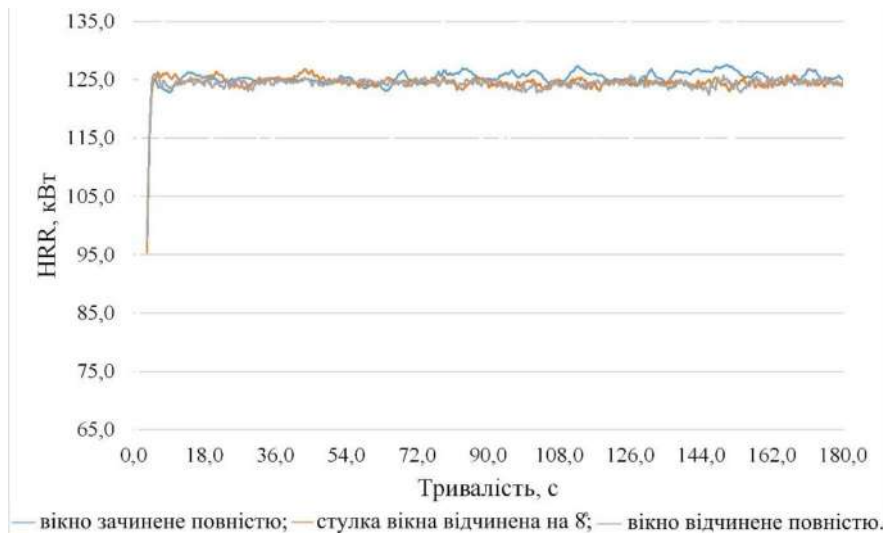


Рис. 3. Залежність тепловиділення (HRR) від тривалості пожежі при різних положеннях ступок вікна

сценаріїв значення тепловиділення HRR залишаються практично сталими та коливаються в межах близько 120–130 кВт. Відмінності між сценаріями вентиляції є незначними і проявляються лише у вигляді малих флуктуацій навколо середнього значення HRR, що свідчить про обмежений вплив вентиляційних умов на інтенсивність тепловиділення за заданого сценарію пожежного навантаження. Це вказує на те, що в даному випадку розвиток пожежі відбувається в режимі, близькому до керованого паливом, а не вентиляцією.

При близьких значеннях тепловиділення для усіх трьох сценаріїв, значення небезпечних чинників пожежі за умови різних сценаріїв відрізнялись один від одного.

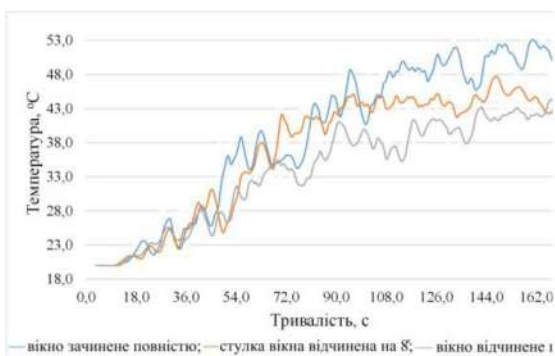
Аналіз графіків (рис. 4) показує, що при моделюванні за першим сценарієм спостерігається найбільш інтенсивне зростання температури та досягнення граничного значення 60 °С [10]. Зокрема, на висоті 0,4 м від підлоги максимальна температура у 54 °С досягається через 145 с, а на висоті 1,7 м граничне значення температури

настає вже через 124 с, що пов'язано з обмеженим тепло- та газообміном і накопиченням тепла в приміщенні.

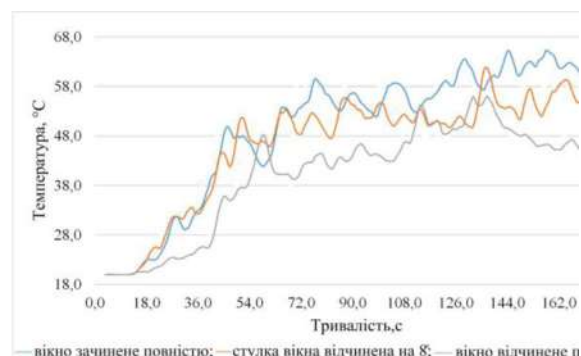
У разі моделювання за другим сценарієм розвитку пожежі крива залежностей має більш згладжений характер. Це говорить про те, що температура зростає повільніше, а її пікові значення є нижчими, що свідчить про часткове відведення тепла завдяки вентиляції, а саме максимальне значення температури у 46 °С досягається на 137 с на висоті 0,4 м від підлоги, а на висоті 1,7 м граничне значення температури настає вже на 133 с.

За умов повністю відчиненого вікна (третій сценарій) фіксуються найнижчі температурні значення протягом усього періоду спостережень, що пояснюється інтенсивним припливом свіжого повітря та ефективним відведенням тепла з приміщення – температура 44°С досягається на 139 с на висоті 0,4 м від підлоги і 57 °С – на 135 с на висоті 1,7 м від підлоги.

Таким чином, результати моделювання показують, що на початковому етапі розвитку пожежі



а)



б)

Рис. 4. Залежність зміни температури в передпокої 1 від тривалості пожежі на різних висотах: а – 0,4 м від підлоги, б – 1,7 м від підлоги

(до 30–40 с) зростання температури повітря спостерігається для всіх сценаріїв, а можливість досягнення критичних значень температури настає тільки на висоті 1,7 м при повністю закритих вікнах в квартирі та відкритій на 8° стулці вікна на кухні. Обмін повітряних мас між приміщеннями житлової квартири та зовнішнім середовищем суттєво впливає на безпеку евакуування людей з приміщень квартири.

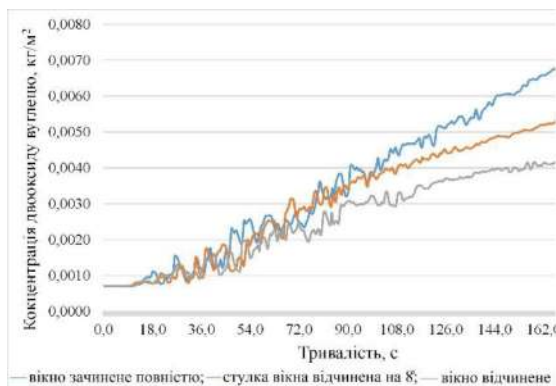
Аналізуючи залежність зміни концентрації двооксиду вуглецю, яка утворюється на висоті 0,4 м, за контрольований час (рисунок 5 (а)), можна зробити висновок, що за різних сценаріїв розвитку пожежі відбувається монотонне зростання концентрації CO₂, що обумовлено перебігом процесів горіння. Максимальні значення концентрації двооксиду вуглецю протягом усього періоду експерименту властиві сценарію із закритим вікном.

На рисунку 5 (б), показана залежність зміни концентрації двооксиду вуглецю на висоті 1,7 м від часу розвитку пожежі. Динаміка збільшення концентрації CO₂ на вказаній висоті відповідає динаміці збільшення концентрації на висоті 0,4 м. Концентрація CO₂ на висоті 1,7 м збільшилась незначно.

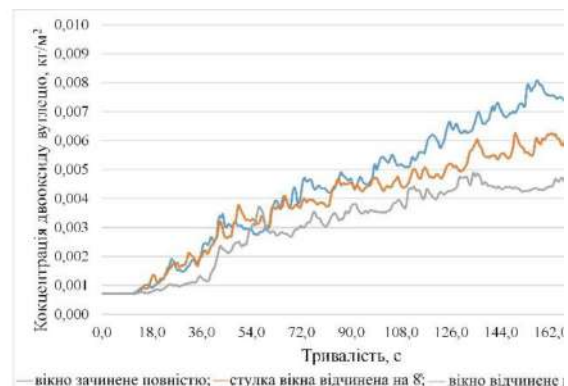
Отримані результати зміни концентрації CO₂ підтверджують, що ступінь відкриття віконного прорізу істотно впливає на динаміку утворення двооксиду вуглецю під час пожежі, але за контрольований час значення концентрації CO₂ не досягло критичної величини. Таким чином, можна зробити висновок, що CO₂ не створить суттєвих перешкод для проведення евакуації людей.

Аналіз результатів моделювання утворення монооксиду вуглецю при розвитку пожежі за трьома сценаріями показує поступове зростання концентрації CO впродовж усього періоду спостереження для всіх сценаріїв і на всіх контрольованих висотах (рис. 6). Найвищі значення концентрації фіксуються за умов зачиненого вікна, що зумовлено обмеженим повітрообміном і накопиченням продуктів неповного згорання. Найінтенсивніше зростання концентрації CO реєструється у зоні дихання на висоті 1,7 м від підлоги (рис. 6, б), що пояснюється тими ж чинниками.

Як показано, за час спостереження концентрація монооксиду вуглецю (CO) на контрольованих висотах не досягла граничного значення ($1,16 \cdot 10^{-3}$ кг/м³ [10]). Однак, отримані результати

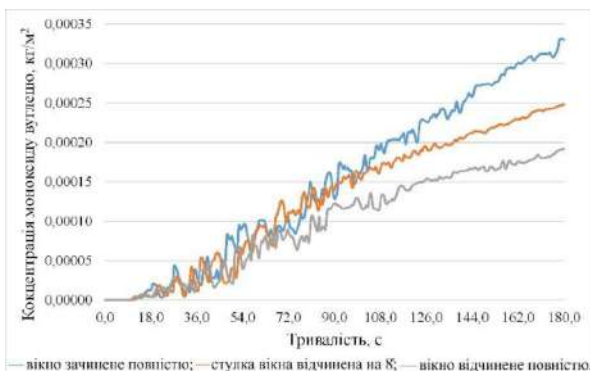


а)

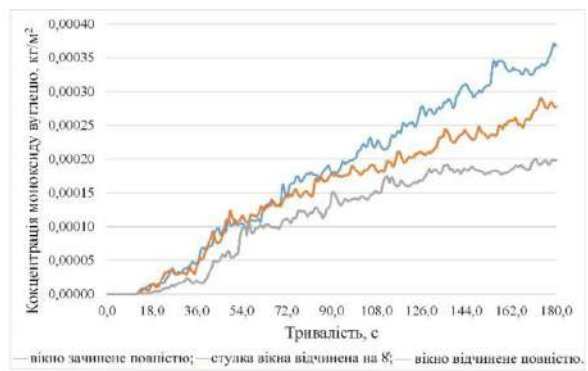


б)

Рис. 5. Залежність зміни концентрації двооксиду вуглецю в передпокої 1 від тривалості пожежі на різних висотах: а – 0,4 м від підлоги, б – 1,7 м від підлоги

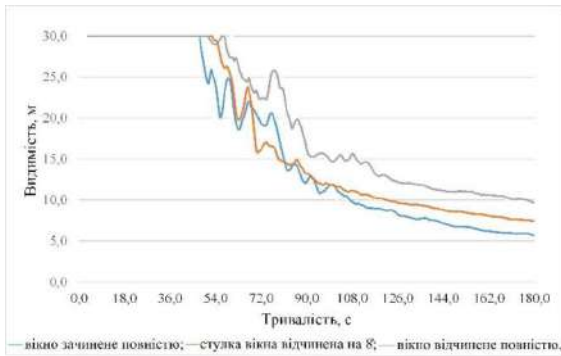


а)

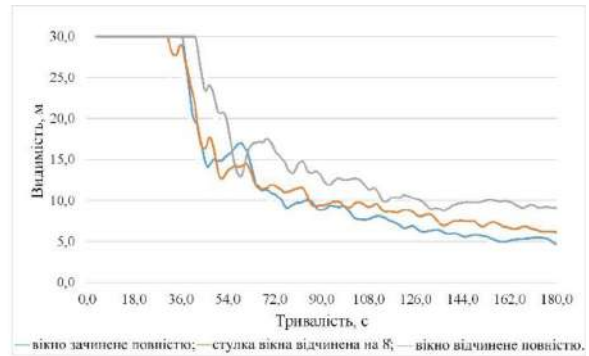


б)

Рис. 6. Залежність зміни концентрації монооксиду вуглецю в передпокої 1 від тривалості пожежі на різних висотах: а – 0,4 м від підлоги, б – 1,7 м від підлоги



а)



б)

Рис. 7. Залежність зміни видимості в передпокої 1 від тривалості пожежі на різних висотах: а – 0,4 м від підлоги, б – 1,7 м від підлоги

підтверджують, що ступінь відчинення віконного прорізу має істотний вплив на рівень концентрації монооксиду вуглецю у зоні дихання, при цьому повністю відчинене вікно є найбільш ефективним з точки зору зниження токсичного впливу під час пожежі. Це має принципове значення для оцінювання небезпеки для людей під час пожежі та умов евакуації.

На рисунку 7 наведено зміну видимості за контрольованій час розвитку пожежі.

Аналізуючи інтенсивність зменшення видимості у передпокої 1 можна зробити висновок, що на характер зміни вказаного параметру суттєво не впливають ні висота, ні повітрообмін.

Але цього не можна сказати про значення видимості, які сягають критичних величин (7 м [10]). Як показано на рисунку 7 (а), критичне значення видимості настає тільки у першому сценарії (всі вікна закриті) на 142 с. Із аналізу залежностей показаних на рисунку 7 (б) випливає, що на висоті 1,7 м критичне значення видимості настає вже у двох сценаріях – на 118 с у першому сценарії та 133 с у другому сценарії.

Найбільш безпечним сценарієм, з точки зору параметру видимості є третій сценарій (студла вікна в кухні повністю відкрита). За цього

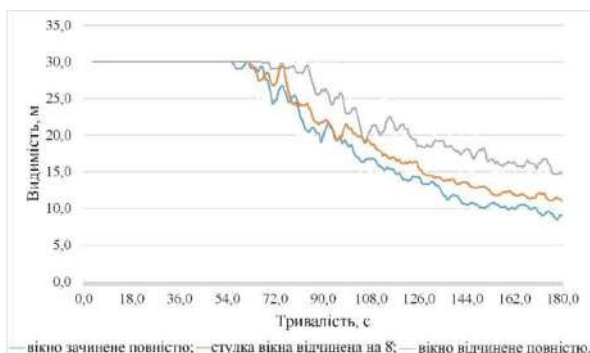
сценарію критичне значення видимості не настає на жодній контрольованій висоті.

Отримані результати підтверджують істотний вплив ступеня відчинення віконного прорізу на динаміку погіршення видимості під час пожежі та свідчать, що інтенсивний повітрообмін забезпечує найбільш сприятливі умови для збереження орієнтації та безпечної евакуації людей.

Порівнюючи утворення граничних значень небезпечних чинників пожежі, можна зробити висновок, що найбільш несприятливий сценарій для проведення евакуації людей з квартири є перший сценарій коли усі вікна в квартирі закриті, тобто обміну повітря між об'ємом квартири і зовнішнім середовищем не відбувається. Найбільш вираженими небезпечними чинниками пожежі, значення яких набувають граничних значень є видимість і температура. Окрім того в переважній більшості граничні значення реєструються на висоті 1,7 м від підлоги.

Враховуючи вищевказане, в інших приміщеннях квартири, які розташовані на більшій відстані від осередку пожежі ніж передпокій 1, визначались значення тільки температури і видимості на висоті 1,7 м.

Зміна видимості і температури у приміщенні передпокою 2 показані на (рис. 8).



а)



б)

Рис. 8. Залежність зміни небезпечних чинників пожежі (а – видимості, б – температури) в передпокої 2 від тривалості пожежі

На рисунку наведено результати моделювання зміни видимості в коридорі квартири на висоті 1,7 м залежно від часу розвитку пожежі на кухні за трьох режимів вентиляції: повністю зачинене вікно, часткове відкривання стулки (8°) та повністю відчинене вікно. Оскільки, коридор є транзитною зоною між осередком пожежі (кухнею) та іншими приміщеннями, динаміка його задимлення є критичною для забезпечення безпечної евакуації.

На рисунку 8 (а) наведено залежності зміни видимості в передпокої 2 на висоті 1,7 м. Аналізуючи залежності було встановлено, що для сценарію 3 спостерігається найменша інтенсивність зниження видимості. Наприкінці контрольованого періоду часу її значення знаходиться в межах 15–18 м.

Моделювання за умов сценарію 2 погіршення видимості починається раніше – приблизно на 65–70 с. На 180-й секунді її значення становить близько 11–12 м.

Найменше значення видимості настає за умов сценарію 1. Вже після 55-ї секунди розпочинається стрімке падіння видимості. Наприкінці розрахункового інтервалу видимість досягає мінімального значення – близько 8,5–9,0 м, але враховуючи, що граничне значення видимості для передпокою 2 становить 3 м, відповідно до вимог [10], можна зробити висновок, що граничне значення видимості на висоті 1,7 м не настане за будь-яких сценаріїв.

На рисунку 8 (б) наведено зміну температури в передпокої 2 на висоті 1,7 м при повністю зачиненому вікні, частковому відкриванні стулки (8°) та повністю відчиненому вікні. Для сценарію 3 характерне повільне збільшення температури. Після 18-ї секунди спостерігається поступове підвищення показників, які наприкінці періоду моделювання (180 с) стабілізуються на рівні 32–34 $^\circ\text{C}$.

За умов сценарію 2 динаміка прогріву є вищою. Температура починає активно зростати

після 15-ї секунди і наприкінці розрахункового інтервалу досягає значень 37–38 $^\circ\text{C}$. Як і для параметру видимості, найбільш несприятливий сценарій спостерігається у випадку № 1. Відсутність шляхів відведення тепла спричиняє швидку термічну деградацію середовища. Вже на 145-й секунді зафіксовано найвищі значення температури близько 41–42 $^\circ\text{C}$, а наприкінці дослідження показник коливається в межах 40–42,5 $^\circ\text{C}$.

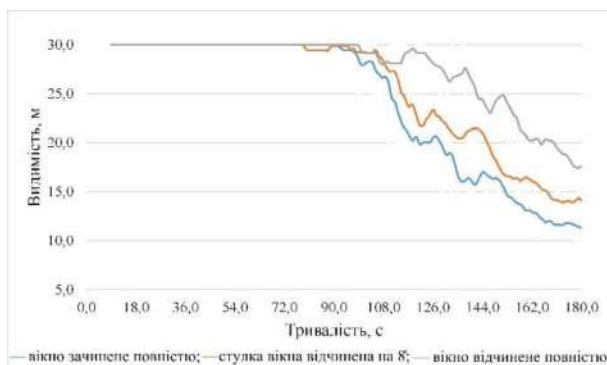
Отримані результати демонструють, що в передпокої 2, як у транзитній зоні, видимість і температурний режим критично залежить від умов вентиляції приміщення, в якому знаходиться осередок пожежі. Це підкреслює визначальну роль повітрообміну у сповільненні темпів досягнення критичних параметрів середовища на шляхах евакуації.

Динаміка зміни видимості у кімнаті 1 за різних сценаріїв представлена на рисунку 9.

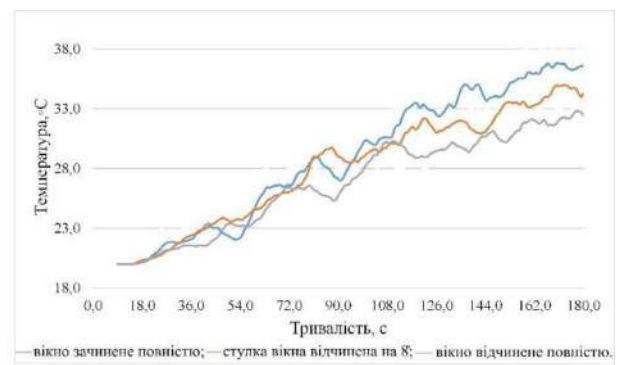
У початковий проміжок часу значення показника для всіх трьох сценаріїв залишаються практично сталими та близькими між собою, що свідчить про відсутність суттєвого впливу повітрообміну на початковому етапі моделювання. Після приблизно 90 с спостерігається значне зниження видимості, інтенсивність якої залежить від ступеня відчиненої стулки вікна. Найшвидше зменшення значень видимості зафіксовано для сценарію 1, тоді як за сценарію 3 спостерігається найповільніша зміна видимості та збереження вищих значень протягом усього часу моделювання.

На рисунку 9 (б) наведено часову залежність температури повітря, виміряної у кімнаті 1. Як і у випадку видимості на початковій стадії розвитку пожежі, до приблизно 25 с значення зміни температури для всіх сценаріїв є близькими. Із збільшенням тривалості горіння спостерігається стале зростання температури повітря.

Найвищі значення температури протягом усього періоду спостережень зафіксовано

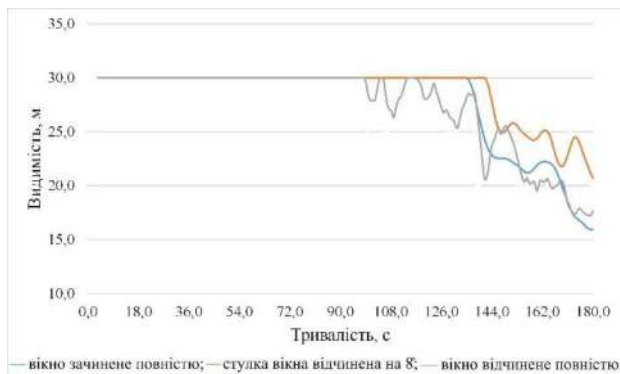


а)

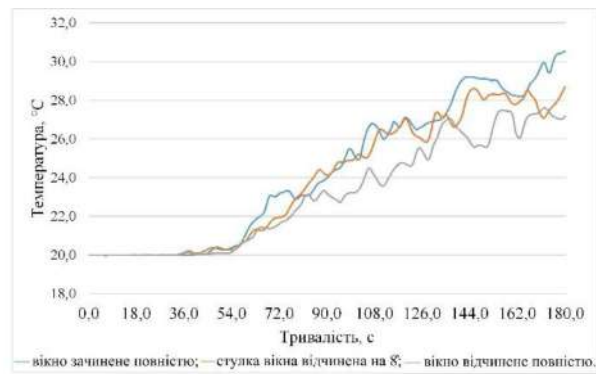


б)

Рис. 9. Залежність зміни небезпечних чинників пожежі (а – видимості, б – температури) в кімнаті 1 на висоті 1,7 м від тривалості пожежі



а)



б)

Рис. 10. Залежність зміни небезпечних чинників пожежі (а – видимості, б – температури) в кімнаті 2 на висоті 1,7 м від тривалості пожежі

у сценарії 1. Найнижчі температурні значення спостерігаються у випадку сценарію 3.

Значення видимості і температури протягом усього контрольованого часу знаходяться у допустимих межах.

На рисунку 10 (а) змодельована залежність зміни видимості в приміщенні 2 на висоті 1,7 м за умов різних сценаріїв.

Якщо у квартирі усі вікна закриті, що відповідає сценарію 1, значення видимості протягом тривалого періоду моделювання (130 с) залишалося практично незмінним і тільки після завершення цього періоду зменшується до 16 м в кінці контрольованого періоду часу. Це свідчить про відсутність суттєвого проникнення продуктів горіння до вказаної кімнати та обмежений масообмін між приміщеннями. Аналогічна картина спостерігається у випадку часткового відкривання вікна на 8°. Незначний приплив повітря не призводить до інтенсифікації горіння настільки, щоб спричинити помітне поширення диму в суміжне приміщення, але параметр видимості в кінці контрольованого періоду часу має більше значення – 20 м.

Принципово інша динаміка зафіксована при повністю відчиненому вікні. До приблизно до 90 с розвитку пожежі видимість у спальні залишалася на рівні, близькому до початкового. Після цього відбувається плавне зниження показника – до 18 м із помітним коливаннями. Така поведінка пояснюється переходом пожежі в більш інтенсивну фазу внаслідок покращення умов аерації, що сприяє збільшенню тепловиділення та формуванню стійких конвективних потоків, які транспортують продукти горіння до спальні. Наявність коливань кривої свідчить про нестационарний характер процесів димоутворення та перерозподілу повітряних мас.

Отримані результати демонструють визначальну роль вентиляційного режиму у формуванні умов задимлення суміжних приміщень.

Повне відкривання вікна в зоні пожежі суттєво підсилює димоперенесення, тоді як обмежена або відсутня аерація сприяє локалізації продуктів горіння в межах приміщення осередку пожежі на початковому етапі її розвитку.

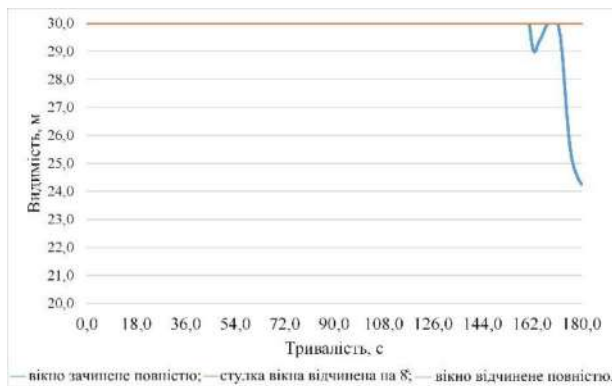
На рисунку 10 (б) представлено зміну температури повітря у кімнаті 2 на висоті 1,7 м.

За умов сценарію 1 температура у вказаній кімнаті протягом перших 36 с практично не відрізняється від початкового значення (20 °C). Надалі спостерігається поступове зростання температури з досягненням наприкінці розрахункового періоду значень близько 31 °C. Плавний характер кривої свідчить про обмежений теплообмін між приміщеннями та стриманий розвиток пожежі внаслідок дефіциту окисника.

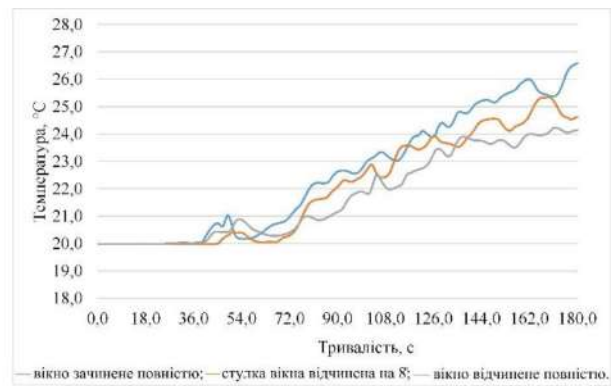
У випадку часткового відкривання (сценарій 2) температурна динаміка має подібний характер, однак максимальні значення є дещо нижчими та становлять близько 29 °C. Незначний приплив повітря не призводить до істотної інтенсифікації горіння, а формування конвективних потоків, здатних переносити нагріті продукти горіння до спальні, залишається обмеженим.

Інша картина спостерігається за умови повністю відчиненого вікна (сценарій 3). Починаючи з того ж часу що і в попередніх сценаріях розвитку пожежі, фіксується більш інтенсивне зростання температури у кімнаті 2 з періодичними коливаннями, що свідчить про нестационарний характер процесів тепло- та масообміну. Наприкінці досліджуваного інтервалу температура досягає 31 °C. Така динаміка пояснюється покращенням умов аерації осередку пожежі, що сприяє збільшенню тепловиділення та формуванню стійких конвективних потоків, які транспортують нагріті гази в суміжні приміщення.

Хоча параметри небезпечних чинників пожежі не досягають граничних значень, отримані результати підтверджують, що вентиляційний режим



а)



б)

Рис. 11. Залежність зміни небезпечних чинників пожежі (а – видимості, б – температури) в кімнаті 3 на висоті 1,7 м від тривалості пожежі

є визначальним чинником формування температурного поля в приміщеннях, суміжних із осередком пожежі. Повне відкривання вікна істотно підсилює тепловий вплив на спальню, тоді як обмежена або відсутня аерація сприяє локалізації теплового навантаження в межах приміщення загоряння на початковій стадії розвитку пожежі.

На рисунку 11 (а) наведено залежності зміни видимості у кімнаті 3 на висоті 1,7 м за умов різного положення стулки вікна приміщення кухні, що відповідає різним сценаріям моделювання розвитку пожежі і розповсюдження небезпечних чинників пожежі.

За умов сценарію 2 і 3 видимість протягом усього періоду моделювання залишається сталою на рівні близько 30 м. Це свідчить про відсутність суттєвого надходження продуктів горіння до дитячої кімнати та стабільний аеродинамічний режим, за якого поширення диму в суміжні приміщення є мінімальним. Така поведінка може бути зумовлена формуванням переважаючого напрямку конвективних потоків, що забезпечують переміщення продуктів горіння через проріз кухонного вікна без їх інтенсивного проникнення до кімнати 3.

Інша динаміка спостерігається у випадку сценарію 1. Приблизно до 155–160 с видимість залишається стабільною (≈ 30 м), після чого відбувається її різке зниження до 24–25 м наприкінці досліджуваного періоду. Така затримка в часі свідчить про поступове накопичення продуктів горіння у квартирі в умовах обмеженої вентиляції та їх подальше перетікання до суміжних приміщень після досягнення певного критичного значення об'єму димових газів у проміжному приміщенні (передpokій 2).

Аналізуючи отримані залежності можна зробити висновок, що характер задимлення суміжних приміщень визначається не лише інтенсивністю горіння, а й конфігурацією повітрообміну

та просторовим розташуванням кімнат відносно осередку пожежі.

На рисунку 11 (б) зображено результати моделювання залежності температурного режиму в кімнаті 3 на висоті 1,7 м.

Для сценарію 3 зафіксовані показники із найменшими змінами за час спостереження. Після 36-ї секунди спостерігається плавне зростання температури, яка наприкінці розрахункового періоду сягає близько 24 °C. Така динаміка зумовлена інтенсивним масообміном повітря із зовнішнім середовищем, що забезпечує ефективне відведення надлишкового тепла та приплив холодного повітря, обмежуючи прогрів приміщення.

За умов часткового відкривання вікна під кутом 8° (сценарій 2) характер зміни температури є подібним, проте значення температури отримані за час спостереження є вищим і становить приблизно 25,5 °C. Обмежена аерація дещо стримує тепловий вплив порівняно з герметичним приміщенням, але не забезпечує достатнього охолодження конвективних потоків, що надходять з осередку пожежі.

Найбільше збільшення температури спостерігається у випадку сценарію 1. Відсутність вентиляції призводить до інтенсивного акумулювання теплової енергії у внутрішньому об'ємі квартири. Після початкової затримки (до 36 с) температура стрімко зростає, досягаючи свого максимального значення у 26,5 °C на 180-й секунді. Це свідчить про швидке прогрівання повітряного шару простору кімнати 3 під стелею та їх подальше і поступове підвищення температури на контрольованій висоті.

Аналізуючи результати моделювання можна зробити висновок, що незважаючи на те, що в жодному сценарії досягнення граничних значень видимості і температури не відбулось, величина відкритого віконного прорізу у приміщенні, у якому виникла пожежа, безпосередньо визначає

Зведені дані про настання граничних значень небезпечних чинників пожежі

Небезпечний чинник пожежі	Висота, м	Сценарій 1					Сценарій 2					Сценарій 3				
		Передпокії 1	Передпокії 2	Кімната 1	Кімната 2	Кімната 3	Передпокії 1	Передпокії 2	Кімната 1	Кімната 2	Кімната 3	Передпокії 1	Передпокії 2	Кімната 1	Кімната 2	Кімната 3
Видимість	0,4	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	1,7	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Температура	0,4	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	1,7	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
CO	0,4	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	1,7	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
CO ₂	0,4	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	1,7	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

швидкість досягнення граничних значень видимості і температури суміжних приміщеннях.

Зведені дані про настанні граничних значень небезпечних чинників пожежі наведено у таблиці 1 (настання граничного значення виділено червоним, ненастання – зеленим).

Висновки. Комп'ютерне чисельне моделювання різних сценаріїв розвитку пожеж у приміщеннях житлової квартири за допомогою програмного комплексу (FDS) PyroSim дало можливість проаналізувати розповсюдження продуктів горіння і утворення граничних значень небезпечних чинників пожежі та показати їх вплив на безпеку евакуації людей.

Аналіз моделювання показав, що визначальними чинниками пожежі, які можуть вплинути на безпеку евакуування людей є видимість і температура. При пожежі в приміщенні кухні, видимість та температура досягає граничних значень тільки у приміщенні передпокою 1. При зачиненому вікні в кухні граничне значення видимості на висоті 1,7 м настає на 118 с, а на висоті 0,4 м на 142 с. Граничне значення температури на висоті 1,7 м настає на 124 с. При відчиненій стулці вікна на 8° в приміщення кухні граничні значення видимості та температури на висоті 1,7 м настає на 133 с. При повністю відчиненому вікні в кухні граничне значення видимості та температури не настає на жодній контрольованій висоті. Граничні значення концентрації CO і CO₂ не настають у всіх приміщеннях за будь яких умов, крім кухні.

Аналізуючи динаміку зміни значень небезпечних чинників пожежі, враховуючи різні умови розвитку пожежі, пов'язані з різним положення стулки вікна приміщення кухні, можна зробити висновок, що отримані результати підтверджують суттєвий вплив вентиляції на температурний режим у зоні дихання людини під час пожежі

в житловому приміщенні та мають важливе значення для оцінювання умов евакуації і рівня пожежної безпеки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Інформаційно-аналітична довідка про надзвичайні ситуації в Україні, що сталися упродовж 2025 року. URL: <https://dsns.gov.ua/upload/2/5/4/5/2/2/7/12-2026.pdf>.

2. Вовк С. Я., Шаповалов О. В., Кушнір А. П., Ференц Н. О. Аналіз шляхів забезпечення протипожежного захисту висотних будівель. *Пожежна безпека*. 2025. № 46. С. 30–44. DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.46.2025.03>

3. Ємельяненко С. О., Харчук А. І., Міллер О. В., & Мартин О. М. Аналіз пожежних ризиків висотних та багатоповерхових житлових будинків м. Львова. *Пожежна безпека*. 2015. № 27. С. 57–63. URL: <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/view/249>.

4. Шналь Т. М., Поздєєв С. В., Яковчук Р. С., Некора О. В., Сідей С. О. Математична модель розвитку пожежі у триповерховій будівлі при проведеному у ній повномасштабних вогневих випробувань. *Пожежна безпека*. 2020. № 36. С. 121–130. URL: <http://hdl.handle.net/123456789/6941>

5. Yakovchuk R., Kuzyk A., Skorobagatko T., Yemelyanenko S., Borys O., Dobrostan O. Computer simulation of fire test parameters façade heat insulating system for fire spread in fire dynamics simulator (FDS). *News of the national academy of sciences of the republic of kazakhstan series of geology and technical sciences*: 2020. P. 35–44. DOI:10.32014/2020.2518-170X.82

6. Yakovchuk R., Kuzyk A., Kagitin O., Ivanusa A., Yemelyanenko S. FDS simulation of fire spreading on facade heat insulating system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: International Conference on Sustainable Future and Environmental Science*. 2020. 16–18 October 2020, Bucharest, Romania. pp. 1–13. DOI: 10.1088/1755-1315/635/1/012009

7. Karunaratne T. L. W., Chow C. L. Upward fire spread hazard of vertical greenery systems: A comparative study with external thermal insulation composite system and double-skin façade. *Fire*. 2023. 6(5), 200. DOI: <https://doi.org/10.3390/fire6050200>

8. Enaru I., Chereches N. C., Hudişteanu S. V., Ţurcanu E. F., Ancas A. D., Verdeş M., Ciocan V. Numerical simulation evaluation of fire spreading in a building using fire dynamics simulator (FDS). *Journal of Applied Engineering Sciences*. 2023. 13(1). P. 65–72. DOI: 10.2478/jaes-2023-0009

9. Vovk S., Kopchak B., Kushnir A., Shapovalov O., Ferents N. (2025). Research into the dynamics of fire development and the efficiency of the fire alarm system in a high-rise building. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B. Natural, Exact, and Applied Sciences*. 2025. 79 (5–6), P. 289–301. DOI: 10.2478/prolas-2025-0024

10. Пожежна безпека. Загальні положення: ДСТУ 8828:2019 [Чинний від 2020–01–01]. *Держстандарт України*, 2019. 84 с.

11. Ференц Н. О., Вовк С. Я., Керод І., Артеменко Б. Дослідження можливості евакуації з виробничого цеху паперової фабрики. *Вісник Львівського національного екологічного університету. Серія «Архітектура та будівництво»*. 2024. (23). С. 76–83. DOI: 10.31734/architecture2022.23.076.

12. Hulida E., Pasnak I., Koval O., Tryhuba A. Determination of the critical time of fire in the building and ensure successful evacuation of people. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2019. 63(1). С. 308–316. DOI: <https://doi.org/10.3311/PPci.12760>

13. Лазаренко О. В., Сукач Р. Ю., Великий Я. Б., Бойчук Б. Я. Оцінка ефективності застосування дрібнорозпиленних струменів води під час гасіння пожеж у підвальних приміщеннях. *Пожежна безпека*. 2025. № 46. С. 72–77. DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.46.2025.07>

14. Хлевной О. В., Вовк С. Я., Жезло-Хлевна Н. В., Харишин Д. В. Вплив природної вентиляції на блокування за втрати видимості евакуаційних виходів на початковій стадії розвитку пожежі. *Пожежна безпека* 2025. № 47. С. 113–121. DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.47.2025.12>

15. Висотні будівлі. Основні положення: ДБН В.2.2-41:2019 [Чинний від 2020–01–01]. *Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України* 2019. 47с.

REFERENCES

1. Informatsiino-analitychna dovidka pro nadzvychaini sytuatsii v Ukraini, shcho stalysia uprodovzh 2025 roku. [Information and analytical report on emergencies in Ukraine that occurred during 2025]. Retrieved from: <https://dsns.gov.ua/upload/2/5/4/5/2/2/7/12-2026.pdf>. [in Ukrainian].

2. Vovk S. Y., Shapovalov O. V., Kushnir A. P. & Ferents N. O. (2025). Analiz shliakhiv zabezpechennia

protypozhezhnoho zakhystu vysotnykh budivel. [Analysis of methods for ensuring fire protection of high-rise buildings]. *Pozhezhna bezpeka – Fire safety*, 46, 30–44. [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.46.2025.03>

3. Yemelyanenko S. O., Kharchuk A. I., Miller O. V. & Martyn O. M. (2015). Analiz pozhezhnykh ryzykiv vysotnykh ta bahatopoverkhovykh zhytlovykh budynkiv m. Lvova. [Analysis of fire risks in high-rise and multi-storey residential buildings in Lviv]. *Pozhezhna bezpeka – Fire safety*, 27, 57–63. URL: <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/view/249>. [in Ukrainian].

4. Shnal T. M., Pozdieiev S. V., Yakovchuk R. S., Nekora O. V., & Sidei S. O. (2020). Matematychna model rozvytku pozhezhi u trypoverkhovii budivli pry provedenni u nii povnomasshtabnykh vohnevnykh vyprobuvan. [Mathematical model of fire development in a three-story building during full-scale fire testing]. *Pozhezhna bezpeka – Fire safety*, 36, 121–130. URL: <http://hdl.handle.net/123456789/6941>. [in Ukrainian].

5. Yakovchuk R., Kuzyk A., Skorobagatko T., Yemelyanenko S., Borys O. & Dobrostan, O. (2020). Computer simulation of fire test parameters façade heat insulating system for fire spread in fire dynamics simulator (FDS). *News of the national academy of sciences of the republic of kazakhstan series of geology and technical sciences*, 2020, 35–44. DOI:10.32014/2020.2518-170X.82

6. Yakovchuk R., Kuzyk A., Kagitin O., Ivanusa A. & Yemelyanenko, S. (2021). FDS simulation of fire spreading on facade heat insulating system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (pp. 1–13). 16–18 October 2020, Bucharest, Romania. DOI:10.1088/1755-1315/635/1/012009

7. Karunaratne T. L. W., & Chow C. L. (2023). Upward fire spread hazard of vertical greenery systems: A comparative study with external thermal insulation composite system and double-skin façade. *Fire*, 6(5), 200. DOI: <https://doi.org/10.3390/fire6050200>

8. Enaru I., Chereches N. C., Hudişteanu S. V., Ţurcanu E. F. & Ancas A. D., Verdeş M. et al. (2023). Numerical simulation evaluation of fire spreading in a building using fire dynamics simulator (FDS). *Journal of Applied Engineering Sciences*, 13(1), 65–72. DOI: 10.2478/jaes-2023-0009

9. Sergiy V., Kopchak B., Kushnir A., Shapovalov O. & Ferents N. (2025). Research into the dynamics of fire development and the efficiency of the fire alarm system in a high-rise building. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B. Natural, Exact, and Applied Sciences*, 79 (5–6), 289–301. DOI: 10.2478/prolas-2025-0024

10. Pozhezhna bezpeka. Zahalni polozhennia DSTU 8828:2019. [Fire Safety. General Provisions: State Standard 8828: 2019]. (2019): from 1th January 2020. Derzhstandart Ukraine [in Ukrainian].

11. Ferents N., Vovk S., Kerod I. & Artemenko B. (2024). Doslidzhennia mozhlyvosti evakuatsii z vyrob-

nychoho tsekhu paperovoi fabryky. [Study of the possibility of evacuation from the production workshop of a paper mill]. *Visnyk Lvivskoho natsionalnoho ekolohichnoho universytetu. Seriya "Arkhitektura ta budivnytstvo"* – *Bulletin of Lviv National Environmental University. Series "Architecture and Construction"*, 23, 76–83. DOI: 10.31734/architecture2022.23.076 [in Ukrainian].

12. Hulida E., Pasnak I., Koval O. & Tryhuba A. (2019). Determination of the critical time of fire in the building and ensure successful evacuation of people. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 63(1), 308–316. <https://doi.org/10.3311/PPci.12760>

13. Lazarenko, O., Sukach, R., Velykyi, Y. & Boichuk, B. (2025). Otsinka efektyvnosti i zastosuvannya dribnorozpylenykh strumeniv vody pid chas hasinnia pozhezh u pidvalnykh prymishcheniakh. [Assessment of the effectiveness of using finely atomized water jets during fire extinguishing in basement premises].

Pozhezhna bezpeka – Fire safety, 46, 72–77. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.46.2025.07> [in Ukrainian].

14. Khlevnoi, O. V., Vovk, S. Y., Zhevlo-Khlevna, N. V. & Kharyshyn, D. V. (2025). Vplyv pryrodnoi ventyliatsii na blokuvannya za vtraty vydy-mosti evakuatsiinykh vykhodiv na pochatkovii stadii rozvytku pozhezhi. [The influence of natural ventilation on the blockage due to loss of visibility of evacuation exits at the initial stage of fire development]. *Pozhezhna bezpeka – Fire safety*, 47, 113–121. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.47.2025.12>. [in Ukrainian].

15. Vysotni budivli. Osnovni polozhennia: DBN B.2.2-41:2019. [High-rise buildings. Basic principles-from: building codes B.2.2-41:2019] from 1th January 2020. Ministerstvo rehionalnoho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy. [in Ukrainian].

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

Науково-методична стаття

Дата першого надходження статті до видання: 04.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 29.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

АЛМАЗОВ Камран Джамеледдін Огли, Академія Міністерства надзвичайних ситуацій м. Баку (Азербайджан), в.о. начальника кафедри спеціалізованих дисциплін Пожежної Безпеки, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6483-351X>

БАЛАНЮК Володимир Мірчович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, професор кафедри фізики та хімії горіння, доктор технічних наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0853-4229>

ВЕЛИКИЙ Назарій Романович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, доцент кафедри управління діяльністю підрозділів цивільного захисту інституту післядипломної освіти, доктор філософії, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7967-4491>

ВЕЛИКИЙ Ярема Богданович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, заступник начальника кафедри пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт, кандидат педагогічних наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3241-5211>

ВЕСЕЛІВСЬКИЙ Роман Богданович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, доцент кафедри цивільного захисту навчально-наукового інституту цивільного захисту, кандидат технічних наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3266-578X>

ВОВК Сергій Ярославович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, доцент кафедри превентивної діяльності у сфері пожежної та техногенної безпеки, кандидат технічних наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5278-3754>

ВОЙТОВИЧ Дмитро Петрович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, доцент кафедри пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт, кандидат технічних наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2280-5585>

ВОРОНКО Олександра Романівна, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, курсантка 2-го курсу навчально-наукового інституту пожежної та техногенної безпеки, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3104-6825>

ГРЕЧКА Наталія Василівна, Національний університет цивільного захисту України, магістрант, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9310-7614>

ГУЗАР Назарій Ігорович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, ад'юнкт денної форми здобуття освіти докторантури-ад'юнктури, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7189-6545>

ДЕРЮГІН Олег Валентинович, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», кандидат технічних наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2456-7664>

ЖЕЗЛО-ХЛЕВНА Наталія Володимирівна, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, викладач кафедри інформаційних технологій та систем електронних комунікацій, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3768-2863>

ІЩУК Максим Валерійович, Національний університет цивільного захисту України, здобувач вищої освіти, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0170-1201> – М. В. Іщук

КАРАБИН Оксана Олександрівна, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, доцент кафедри прикладної математики і механіки, кандидат фізико-математичних наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9287-376X>

КАСТРАНЕЦЬ Андрій Михайлович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, старший викладач кафедри превентивної діяльності у сфері пожежної та техногенної безпеки, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3679-9535>

КОВАЛИШИН Василь Васильович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, професор кафедри експлуатації транспортних засобів та аварійно-рятувальних робіт навчально-наукового інституту пожежної та техногенної безпеки, 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, кандидат технічних наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3739-8668>

КОНАНЕЦЬ Роман Миколайович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, начальник кафедри пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт, доктор філософії, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2360-4002>

КРИВУНЕНКО Максим Аркадійович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, викладач кафедри пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9061-9179>

КУЗИК Андрій Данилович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, завідувач кафедри екологічної безпеки, доктор сільськогосподарських наук, професор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0118-9493>

КУШНІР Андрій Петрович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, доцент кафедри превентивної діяльності у сфері пожежної та техногенної безпеки, кандидат технічних наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6946-8395>

ЛАВРЕНЮК Олена Іванівна, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, професор кафедри фізики та хімії горіння, доктор технічних наук, професор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4509-2896>

ЛАЗАРЕНКО Олександр Вікторович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, заступник начальника кафедри превентивної діяльності у сфері пожежної та техногенної безпеки, кандидат технічних наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0500-0598>

ЛИН Андрій Степанович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, доцент кафедри пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт, кандидат технічних наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4012-4556>

ЛОЗИНСЬКИЙ Роман Якович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, професор кафедри фізики та хімії навчально-наукового інституту пожежної та техногенної безпеки, кандидат технічних наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7292-711X>

ЛОЗОВА Діана Русланівна, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, ад'юнкт, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0757-3288>

ЛУЩ Василь Іванович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, доцент 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, докторант денної форми здобуття освіти докторантури-ад'юнктури, кандидат технічних наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7051-4494>

МИХАЛІЧКО 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>

НАЗАР Юлія Сергіївна, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, старший викладач кафедри інформаційних технологій та систем електронних комунікацій, PhD, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0151-8285>

НАЗАРОВЕЦЬ Олег Богданович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, начальник кафедри експлуатації транспортних засобів та пожежно-рятувальної техніки навчально-наукового інституту пожежної та техногенної безпеки, кандидат технічних наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4532-9259>

НІЖНИК Вадим Васильович, Інститут наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України, начальник науково-дослідного центру нормативно-технічного регулювання, доктор технічних наук, професор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3370-9027>

ОСАДЧУК Максим Віталійович, Інститут наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України, науковий співробітник науково-випробувального відділу дослідження пожежно-рятувальної техніки, оснащення та засобів захисту науково-дослідного центру досліджень та випробувань, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4584-3541>

ПАЗЕН Олег Юрійович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, начальник кафедри превентивної діяльності у сфері пожежної та техногенної безпеки, кандидат технічних наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1655-3825>

ПАНЧИШИН Юрій Ігорович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, старший викладач кафедри пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8056-2326>

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>

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>

ПИЛИПЕНКО Володимир Миколайович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, старший викладач кафедри інформаційних технологій та систем електронних комунікацій, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5957-4822>

СЕРГЄЄВ Сергій Сергійович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, викладач кафедри превентивної діяльності у сфері пожежної та техногенної безпеки, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3311-9192>

СОЛЯНИК Назар Юрійович, Печерське районне управління цивільного захисту, провідний інспектор відділу № 1 превентивної діяльності та взаємодії з органами державної влади ГУ ДСНС України, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5850-1360>

СУДНІЦИН Юрій Тарасович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, старший викладач кафедри пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4218-8446>

СУКАЧ Роман Юрійович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, доцент кафедри пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт, кандидат технічних наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4174-9213>

ТАЦІЙ Михайло Ігорович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, викладач кафедри превентивної діяльності у сфері пожежної та техногенної безпеки, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0601-8775>

ТЕРЛЕЦЬКИЙ Юрій Олегович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, ТОВ «СВІССКРОНО», аспірант вечірньої форми навчання, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1633-5458>

ТУРОВСЬКА Галина Іванівна, Національний університет водного господарства та природокористування, кандидат технічних наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1492-9123>

ФЕДЮК Ярослав Ігорович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, старший викладач кафедри пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3469-073X>

ФЕРЕНЦ Надія Олександрівна, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, доцент кафедри превентивної діяльності у сфері пожежної та техногенної безпеки, кандидат технічних наук, доцент, 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>

ЦОПА Віталій Андрійович, Міжнародний інститут менеджменту, доктор технічних наук, професор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4811-3712>

ЧЕБЕРЯЧКО Сергій Іванович, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», доктор технічних наук, професор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3281-7157>

ЧЕБЕРЯЧКО Юрій Іванович, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», доктор технічних наук, професор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7307-1553>

ШАЛАПКО Денис Олегович, Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, кандидат технічних наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4311-3908>

ШАПОВАЛОВ Олег Валерійович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, старший викладач кафедри превентивної діяльності у сфері пожежної та техногенної безпеки, кандидат технічних наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8444-2006>