

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

Державна служба України з надзвичайних ситуацій

**Львівський державний університет
безпеки життєдіяльності**

ПОЖЕЖНА БЕЗПЕКА

***збірник
наукових праць***



№44, 2024



МАТЕРІАЛИ ДРУКУЮТЬСЯ УКРАЇНСЬКОЮ,
АНГЛІЙСЬКОЮ ТА ПОЛЬСЬКОЮ МОВАМИ

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

ПОЖЕЖНА БЕЗПЕКА

ЛДУ БЖД

№ 44, 2024

заснований у 2002 році

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

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

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

DOI: 10.32447/20786662.44.2024.00

ВИДАВЕЦЬ

Львівський державний університет
безпеки життєдіяльності (ЛДУ БЖД)

ЗАРЕЄСТРОВАНО

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

**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»

Рекомендовано до друку рішенням Вченої ради ЛДУ БЖД
(Протокол № 12 від 12.06.2024 року)

Літературний редактор Падик Г.М.
Технічний редактор Сорочич М.П.
Комп'ютерна верстка Беген Д.А.
Друк Петролюк Н.І.
Відповідальний за друк Войтович Т.М.

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ: ЛДУ БЖД, вул. Клепарівська, 35, м. Львів, 79007
Контактні телефони: (032) 233-24-79, тел/факс 233-00-88
E-mail: pb_zbirnyk@ldubgd.edu.ua

Збірник наукових праць «Пожежна безпека» видається з 2002 року.
Запланована періодичність: 2 рази на рік. Тематична спрямованість: оригінальні
та оглядові праці в галузі технічних наук з напрямку «пожежна безпека» за
спеціальністю 261 – пожежна безпека.

Здано в набір 23.06.2024. Підписано до друку 26.06.2024.
Формат 60x84^{1/3}. Папір офсетний. Ум. друк. арк. 8,33.
Гарнітура Times New Roman. Друк.
Наклад: 100.
Друк: ЛДУ БЖД
вул. Клепарівська, 35, м. Львів, 79007.

А. Ф. Гаврилюк, Р. С. Яковчук

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ
МОДУЛІВ СИЛОВОЇ БАТАРЕЇ TESLA
MODEL S НА ПРЕДМЕТ ПОЖЕЖНОЇ
НЕБЕЗПЕКИ

5

A. F. Gavryliuk, R. S. Yakovchuk

EXPERIMENTAL RESEARCH OF TESLA
MODEL S POWER BATTERY CELLS FOR
OPEN FLAME FIRE HAZARD

М. Я. Карвацька, П. В. Пастухов,

О. І. Лавренюк, Б. М. Михалічко
КВАНТОВО-ХІМІЧНИЙ АНАЛІЗ
АНТИПРЕНОВОГО ТА
ІНГІБУВАЛЬНОГО ВПЛИВУ
КУПРУМ(ІІ) ХЛОРИДУ НА ГОРІННЯ
НІТРОГЕНВІСНИХ ОРГАНІЧНИХ
РЕЧОВИН

13

M. Karvats'ka, P. Pastuhov,

O. Lavrenyuk, B. Mykhalichko
QUANTUM CHEMICAL ANALYSIS OF
COPPER (II) CHLORIDE'S FLAME
RETARDANT AND INHIBITORY EFFECTS
ON NITROGEN-CONTAINING ORGANIC
SUBSTANCE COMBUSTION

Б. М. Ковалишин, Я. В. Балло,

В. В. Ніжник, І. Г. Стилик, О. І. Казімін
ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМИ
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
ОБМЕЖЕННЯ ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ
ПО ЗОВНІШНІХ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ
КОНСТРУКЦІЯХ

20

B.M. Kovalyshyn, Y.V. Ballo,

V.V. Nizhnyk, I.G. Stylyk, O.I. Kagitin
PROSPECTIVE DIRECTIONS OF
IMPROVING THE EFFICIENCY OF RE-
STRICTIONS FIRE ON EXTERNAL
ENCLOSURE STRUCTURES

В. В. Ковалишин, В. М. Марич, Р. Б.

Веселівський, Вол. В. Ковалишин,
Р. Я. Лозинський
ОБґРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ
ГАСІННЯ КОМБІНОВАНИХ ПОЖЕЖ ЗА
НАЯВНОСТІ ЛЕГКИХ МЕТАЛІВ ЧИ
ФОСФОРНИХ СПОЛУК

30

V. V. Kovalyshyn, V. M. Marych,
R. B. Veselivskyi, Vol. V. Kovalyshyn,
R. Ya. Lozynskyi

SUBSTANTIATION OF TECHNOLOGY
FOR EXTINGUISHING COMBINED FIRES
IN THE PRESENCE OF LIGHT METALS
OR PHOSPHORUS COMPOUNDS

О. В. Лазаренко, В. І. Луц

АНАЛІЗ ЖИТТЄВИХ ПОКАЗНИКІВ
ГАЗОДИМОЗАХИСНИКІВ ПІД ЧАС
ТРЕНУВАННЯ В ТЕПЛОДИМОКАМЕРІ
КОНТЕЙНЕРНОГО ТИПУ

41

O.V. Lazarenko, V. I. Lushch

ANALYSIS OF VITAL SIGNS OF
FIREFIGHTERS DURING TRAINING
IN A CONTAINER-TYPE THERMAL
SMOKE CHAMBER

І. А. Оношко, В. В. Ніжник,

О. М. Чекригін, Т. М. Шналь
АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ВИЗНАЧЕННЯ
ЧАСУ ПОЧАТКУ ЕВАКУАЦІЇ ЛЮДЕЙ
НА ПОЖЕЖІ

49

I. A. Onoshko, V. V. Nizhnyk,

O. M. Chekrygin, T. M. Shnal
ANALYSIS OF RESEARCH
DETERMINED EVACUATION START
TIME PEOPLE ON FIRE

А. А. Ренкас, В. І. Товарянський
АСПЕКТИ ПРИКОРДОННОЇ
ВЗАЄМОДІЇ ПОЖЕЖНО-
РЯТУВАЛЬНИХ ПІДРОЗДІЛІВ
УКРАЇНИ ТА КРАЇН ЄВРОПЕЙСЬКОГО
СОЮЗУ ПІД ЧАС ЛІКВІДАЦІЇ ПОЖЕЖ
В ПРИРОДНИХ ЕКОСИСТЕМАХ

***О. М. Слуцька, Т. М. Скоробагатько,
Д. П. Войтович, Р. Ю. Сукач, І. А. Оношко***
НЕОБХІДНІСТЬ УДОСКОНАЛЕННЯ
ВИМОГ ДО СИСТЕМ ПОЖЕЖНОЇ
СИГНАЛІЗАЦІЇ ТА ОПОВІЩУВАННЯ
ВІДПОВІДНО ДО ЄВРОПЕЙСЬКОЇ
НАСТАНОВИ

***О. В. Шаповалов, С. Я. Вовк,
Н. О. Ференц, І. А. Оношко,
Ю. В. Кіндрацький***
АНАЛІЗ ТА ШЛЯХИ
ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ
ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ
ЛОГІСТИЧНИХ СКЛАДІВ

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

62

A. A. Renkas, V. I. Tovarianskyi
ASPECTS OF BORDER INTERACTION
BETWEEN FIRE AND RESCUE DEPART-
MENTS OF UKRAINE AND THE
EUROPEAN UNION COUNTRIES IN THE
FIELD OF FIRES ELIMINATION IN
NATURAL ECOSYSTEMS

70

***O. M. Slutska, T. M. Skorobagatko
D. P. Voytovych, R. Yu. Sukach, I. A. Onoshko***
THE NECESSITY TO IMPROVE THE
REQUIREMENTS FOR FIRE ALARM
AND WARNING SYSTEMS
FOLLOWING EUROPEAN
GUIDANCE CEN/TS 54-14:2018

81

***O. V. Shapovalov, S. Y. Vovk, N. O. Ferents
I. A. Onoshko, Y. V. Kindratskiy***
ANALYSIS AND WAYS OF IMPROVING
FIRE PROTECTION SYSTEMS OF
LOGISTICS WAREHOUSES

98

**INFORMATION ABOUT
THE AUTHORS**



А. Ф. Гаврилюк, Р. С. Яковчук

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна

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

<https://orcid.org/0000-0001-5523-5569> – Р. С. Яковчук



gavrilyk3@ukr.net

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МОДУЛІВ СИЛОВОЇ БАТАРЕЇ TESLA MODEL S НА ПРЕДМЕТ ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ

Постановка проблеми. Кількість електромобілів у Європі, Америці та Азії продовжує стрімко зростати. Така тенденція зумовлена з одного боку енергетичною кризою, а з іншого – захистом довкілля. Вагомим недоліком літій-іонних батарей є виникнення в їх корпусі, за певних умов, необоротної екзотермічної реакції. З виділенням тепла, горючих та вибухонебезпечних газів, що призводить є не лише до виходу з ладу батареї, але й до займань та вибухів.

Мета дослідження полягає у розкритті особливостей горіння, визначення теплових параметрів (температури спрацювання вентиляційного клапана, займання, горіння) які описують процеси горіння модулів літій-іонних акумуляторів електромобілів (на прикладі модулів силових батарей Tesla model S). Для досягнення задекларованої мети здійснено експериментальні дослідження впливу відкритого полум'я від пропанового пальника на модуль літій-іонного акумулятора електромобіля Tesla model S, а також виявлено та описано особливості розвитку необоротної екзотермічної реакції та особливостей його горіння.

Опис матеріалу. Для дослідження відбирались модулі з силової АКБ електромобіля Tesla model S ємністю 75 кВт·год. Модуль складався із 462 елементів формату 18650 (циліндричної форми діаметром 18 мм та вистою 65 мм). Анод даних елементів живлення виконаний з графіту, а катод – $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$ (NCA). Загальна ємність модуля становила 5,7 кВт·год, а напруга при повній ємності – 27 В. Розміри модуля становили 6550 мм на 2750 мм та висотою 120 мм. Діагностування стану заряду батареї здійснювалось за допомогою цифрового мультиметра. Згідно із методикою досліджень, перед початком випробувань модуль силової літій-іонної батареї піддавався зважуванню. Маса модуля перед початком випробувань становила 28,4 кг.

Для створення теплового потоку використовувався газовий пальник, на який подавався газ пропан з балона об'ємом 50 л. Потужність пальника становила 1 кВт. Для впливу полум'я від пальника та створення необоротної реакції у одному з елементів модуля силової літій-іонної батареї використовувався отвір, розміром 35 мм на 35 мм, який був утворений в металевому листі, на який поміщався модуль. Власне через цей отвір відбувалося нагрівання частини модуля (елемента) за допомогою газового пальника.

Для фіксації температур використовувались термопари хромель-алюмель (ТХА) з діапазоном вимірювання 0-1500 °C та точністю 0,1 °C. Термопари підключались до перетворювача вимірювального інтелектуального ПВІ-111 А. Фіксація температур від термопар здійснювалась кожену секунду та записувалась на накопичувач формату SD перетворювача у вигляді масиву даних.

Висновки. За результатами натурних вогневих випробувань модулів силової АКБ електромобіля Tesla model S за розробленою методикою отримано такі результати. При дії відкритого полум'я на модуль акумуляторної батареї електромобіля Tesla model S спрацювання вентиляційного отвору відбулось на 1545 с після початку проведення експерименту при температурі з обігріваної сторони 613-645 °C, по середині елемента 175-176 °C та з необігріваної сторони 95-96 °C за умов проведення експерименту. Напередодні відкриття вентиляційного отвору відбувається падіння напруги, що свідчить про руйнування сепаратора та виникнення внутрішнього короткого замикання між анодом та катодом елемента. Виділення тепла від чотирьох елементів живлення внаслідок перебігу необоротної екзотермічної реакції та викиду від них вентиляційних газів є достатнім для утворення ланцюгової реакції та полум'яного горіння власне самого модуля літій-іонної батареї. Подальші спрацювання вентиляційних отворів елементів мали стохастичний характер.

Ключові слова: необоротна екзотермічна реакція, Tesla model S, пожежа електромобіля, пожежа.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF TESLA MODEL S POWER BATTERY CELLS FOR OPEN FLAME FIRE HAZARD

Introduction. The number of electric vehicles in Europe, America and Asia continues to grow rapidly. This trend is driven on the one hand by the energy crisis and on the other by environmental protection. A significant disadvantage of lithium-ion batteries is that, under certain conditions, an irreversible exothermic reaction occurs in their bodies. This results in the release of heat, flammable and explosive gases, which leads not only to battery failure but also to fires and explosions.

Purpose. Is to reveal the features of combustion, and determine the thermal parameters (temperature of ventilation valve operation, ignition, combustion) that describe the combustion processes of lithium-ion battery modules of electric vehicles (for example, power battery modules of Tesla Model S). To achieve the declared goal, experimental studies of the effect of an open flame from a propane burner on a lithium-ion battery module of the Tesla Model's electric vehicle were carried out, and the peculiarities of the development of an irreversible exothermic reaction of combustion of lithium-ion battery modules of electric vehicles were identified and described.

Material description. For the research, modules were selected from the power battery of the Tesla Model S electric vehicle with a capacity of 75 kWh. The module consisted of 462 18650 cells (cylindrical in shape with a diameter of 18 mm and a height of 65 mm). The anode of these batteries is made of graphite, and the cathode is $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$ (NCA). The total capacity of the module was 5.7 kWh, and the voltage at full capacity was 27 V. The module dimensions are 6550 mm by 2750 mm and 120 mm high.

The battery charge state was diagnosed using a digital multimeter. According to the research methodology, the power lithium-ion battery module was weighed before the tests. The module weighed 28.4 kg before the start of the tests. A gas burner was used to create the heat flux, which was supplied with propane gas from a 50-litre cylinder. The power of the burner was 1 kW. To expose the flame from the burner and create an irreversible reaction in one of the elements of the lithium-ion power battery module, a 35 mm by 35 mm hole was used, which was formed in the metal sheet on which the module was placed. It was through this hole that a part of the module (cell) was heated using a gas burner. To record the temperatures, chromel-alumel (CA) thermocouples with a measuring range of 0-1500 °C and a step of 1 °C were used. The thermocouples were connected to the measuring intelligent converter PVI-111 A. The temperatures from the thermocouples were recorded every second and recorded on the SD storage device of the converter as a data array.

Conclusions. According to the results of full-scale fire tests of the elements of the power battery of the Tesla Model S electric vehicle using the developed methodology, the following results were obtained. When an open flame was exposed to the battery module of the Tesla Model S electric vehicle, the vent was triggered at 1545 s after the experiment at a temperature of 613-645 °C on the heating side, 175-176 °C in the middle of the cell, and 95-96 °C on the non-heating side under the conditions of the experiment. Before the vent is opened, a voltage drop occurs, which indicates the destruction of the separator and the occurrence of an internal short circuit between the anode and cathode of the cell. This process leads not only to the generation of heat but also to the formation of gases in the lithium-ion cell body. The heat generated by the four batteries as a result of the irreversible exothermic reaction and the release of ventilation gases from them is sufficient to cause a chain reaction and flammable combustion of the lithium-ion battery module itself, under the conditions of the experiment. Further operation of the cell ventilation holes was stochastic.

Keywords: thermal runaway, Tesla Model S, electric vehicle fire, fire.

Постановка проблеми.

Кількість електромобілів продовжує стрімко зростати. Варто відмітити, що сумарна ємність батарей електромобілів у 2022 році перевищила 357 ГВт·год [1], а вартість світового ринку електромобілів до 2025 року становитиме понад 93 млрд. дол. США [2]. Вагомим недоліком літій-іонних батарей (далі – LIB Lithium-ion batteries) є виникнення в їх корпусі, за певних умов, необоротної екзотермічної реакції. Це призводить до виділення тепла, горючих та вибухонебезпечних газів, що призводить не лише до виходу з ладу батареї, але й до займань та вибухів [3-5].

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Для створення необоротної реакції у літій-іонних батареях використовуються різні способи нагрівання.

Larsson та інші [6] використовували відкрий вогонь у камері апарата Single Burning Item, який зазвичай використовується для класифікації будівельних матеріалів згідно зі схемою Європейської класифікації EN 13823. Пропановий пальник був розміщений під елементами/батарейми та запалювався через дві хвилини після початку тесту. Для дослідження використовувались елементи з літій-залізофосфатним катодом (LFP), LiFePO_4 . Пікові значення густини теплового випромінювання змінювалися в досить широкому діапазоні, між 13 і 57 кВт для батарей з енергетичною ємністю 100 Вт·год. Нормоване загальне виділення тепла на енергоємність становило 28–75 кДж Вт·год⁻¹, а нормовані максимальні значення потужності

теплого випромінювання $110\text{--}490 \text{ Вт}\cdot\text{Вт}\cdot\text{год}^{-1}$

Ряд науковців використовують різні електричні нагрівачі для створення необоротної екзотермічної реакції (далі TR — thermal runaway) у LIB. Це обумовлено зручністю використання, простою конструкцією нагрівачів, а також можливістю регулювати потужність нагрівання. Загалом усі електричні нагрівачі, які використовують для створення TR, можна розділити на такі, які гріють LIB, завдяки тепловому випромінюванню, тобто безпосередньо не контактують із LIB і такі, що передають теплову енергію контактним способом — теплопровідністю.

Дослідники у наукових працях [7-9] використовували електричний нагрівач плівкового типу, який безпосередньо контактував із LIB. Для досліджень використовувались літій-кобальт-оксидні елементи формату 18650 і номінальною електричною ємністю $2600 \text{ мА}\cdot\text{год}$. Встановлено, що нижня межа займистості горючих газоподібних продуктів становить $5,79 \pm 0,12 \text{ об.}\%$ у повітрі. Обчислено хімічне виділення тепла в результаті реакцій між матеріалами батареї всередині та поза корпусом елементів, яке становить $56,6 \pm 2,5 \text{ кДж}$ на елемент, а загальна кількість тепла, що виділяється від полум'яного горіння, становить $60,1 \pm 17,5 \text{ кДж}$ на елемент.

У наукових працях [10-11] використано електронагрівальну спіраль, яка намотувалась на корпус та нагрівала досліджуваний взірць LIB. Дослідженню піддавались взірці літій-іонних батарей типу Li ($\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z$) O_2 ємністю $4600 \text{ мА}\cdot\text{год}$. При цьому всебічно досліджено вплив зовнішнього тиску, де встановлено, що з найвищою швидкістю полум'я розповсюджуються при тиску 60 кПа .

Автори у своїх роботах [12, 13] з використанням FDS — моделювання провели дослідження температурних параметрів під час пожежі електромобіля на закритому паркінгу. На підставі моделювання визначено, що з врахуванням критерію значення температури в 120°C на стіні будівлі і часу вільного розвитку пожежі 600 с мінімальна протипожежна відстань від електромобіля до стіни будівель різного функціонального призначення повинна становити не менше 3 м .

У роботі [14] автори провели чисельний аналіз батареї NMC пакетного типу ємністю $200 \text{ Вт}\cdot\text{год}$ та станом заряду (SOC) 50% за допомогою ANSYS Fluent v19.2. Для виникнення TR використовувався бутановий палик потужністю 12 кВт . На підставі моделювання встановлено критичний час для

поширення TR між модулями LIB. Власне час поширення пожежі від першого модуля до п'ятого становить понад 700 с .

Автори роботи [15] для дослідження LIB використовували калориметр, а для виникнення TR у LIB — теплову панель потужністю 30 кВт . Під час експериментальних досліджень виділено дві стадії горіння LIB. Перша стадія характеризується дифузійним полум'ям, а друга — частково змішаним полум'ям із найвищим значенням теплового випромінювання і сильним вибухом.

У науковій роботі [16] проведено експериментальні дослідження з використанням відкритого полум'я власне на окремо взятих літій-іонних елементах від батареї електромобіля Tesla model S, де встановлено, що при дії полум'я на вертикально розміщені елементи анодом вниз, вентиляційний отвір спрацьовує найпізніше, а при горизонтальному розміщенні — найшвидше.

Автори роботи [17] досліджували механічний вплив на літій-іонний елемент живлення Panasonic NCR18650B. За результатами досліджень встановлено, що корпус досліджувальних взірців Panasonic NCR18650B витримує без подальшого займання навантаження близько $7,84 \text{ МПа}$. Збільшення навантаження призводить до займання дослідних взірців.

Аналіз наукових праць показав, що для досліджень зазвичай використовують елементи від силових батарей з малою ємністю — $8\text{--}20 \text{ Вт}\cdot\text{год}$, а дослідженням які стосуються великоємних літій-іонних батарей електромобілів приділена недостатня увага.

Мета і задачі дослідження. Мета дослідження полягає у розкритті особливостей та визначенні теплових параметрів (температури спрацювання вентиляційного клапана, займання), які описують процеси горіння модулів літій-іонних акумуляторів електромобілів (на прикладі модулів силових батарей Tesla model S).

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі задачі:

- експериментально дослідити вплив відкритого полум'я на модуль літій-іонного акумулятора електромобіля Tesla model S;

- виявити та описати особливості розвитку необоротної екзотермічної реакції та особливості горіння модулів літій-іонних акумуляторів електромобілів.

Опис експериментальної частини.

Для дослідження відбирались модулі з силової АКБ електромобіля Tesla model S ємністю $75 \text{ кВт}\cdot\text{год}$ (рис 1).



а)



б)

Рисунок 1 – Зовнішній вигляд модуля силової АКБ електромобіля TESLA MODEL S :
а) вигляд згори б) вигляд збоку

Модуль складався із 462 елементів формату 18650 (циліндричної форми діаметром 18 мм та вистою 65 мм). Анод даних елементів живлення виготовлений з графіту, а катод – з $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$ (NCA). Загальна ємність модуля становила 5,7 кВт·год, а напруга при повній ємності – 27 В. Розміри модуля становлять 6550 мм на 2750 мм та висотою 120 мм, а заряд – 65 %. Модулі були у справному стані та візуально без пошкоджень.

Діагностування стану заряду батареї здійснювалось за допомогою цифрового мультиметра. Напруга модуля перед початком випробувань становила 24,8 В.

Згідно із методикою досліджень, перед початком випробувань модуль силової літій-іонної батареї піддавався зважуванню. Маса модуля перед початком випробувань становила 28,4 кг.

Для створення теплового потоку використовувася газовий пальник, на який подавався газ пропан з балона об'ємом 50 л, потужність пальника 1 кВт.

У металевому листі, на якому було розміщено модуль силової літій-іонної батареї, зроблено отвір розміром 35x35 мм. Через цей отвір відбувалося нагрівання полум'ям від напальника частини модуля (елемента) для виникнення у ньому необоротної реакції.

Для фіксації температур використовувались термопари хромель-алюмель (ТХА) з діапазоном вимірювання 0-1500 °C та точністю 0,1 °C. Термопари було під'єднані до перетворювача

вимірювального інтелектуального ПБІ-111 А, який фіксував температуру термопар. Для більшої точності отриманих результатів здійснювалась відеофіксація температурних параметрів, які відображались на екрані ПБІ-111 А. З відео ми брали температурні параметри з частотою 1 Гц, а параметри з SD-карти були резервними та враховувались при верифікації.

Розміщення термопар у модулі зображено на рисунку 2 а, де рисунок І)- вигляд збоку, а ІІ)-вигляд знизу. Натурний вигляд розміщення отворів та влаштування термопар приведено на рисунку 2 б, де рисунок І) вигляд зверху, а рисунок ІІ) вигляд знизу. Для де І-вигляд збоку, а ІІ)- вигляд знизу.

розміщення термопар було зроблено два отвори діаметром 3 мм у модулі поруч із елементом, який піддавався нагріванню. Загалом було зроблено 8 термопар. Для фіксації спаду напруги на елементі, який піддається тепловому впливу, до катода та анода під'єднується двожильний провідник ПВ січенням 1,5 мм², а іншим кінцем-до цифрового мультиметра. На рисунку 2 в наведено загальну схему влаштування випробувальних зразків та засобів вимірювальної техніки, де 1 - модуль силової АКБ, яка піддається дослідженню, 2 - термопари (кількість зображено умовно), 3 - перетворювач вимірювального інтелектуального ПБІ - 111 А, 4 - мультиметр цифровий, 5 - електричний провідник, 6 - балон із зрідженим пропаном, 7 - пальник з вентилем. Місце перед початком проведення експерименту наведено на рисунку 2 г.

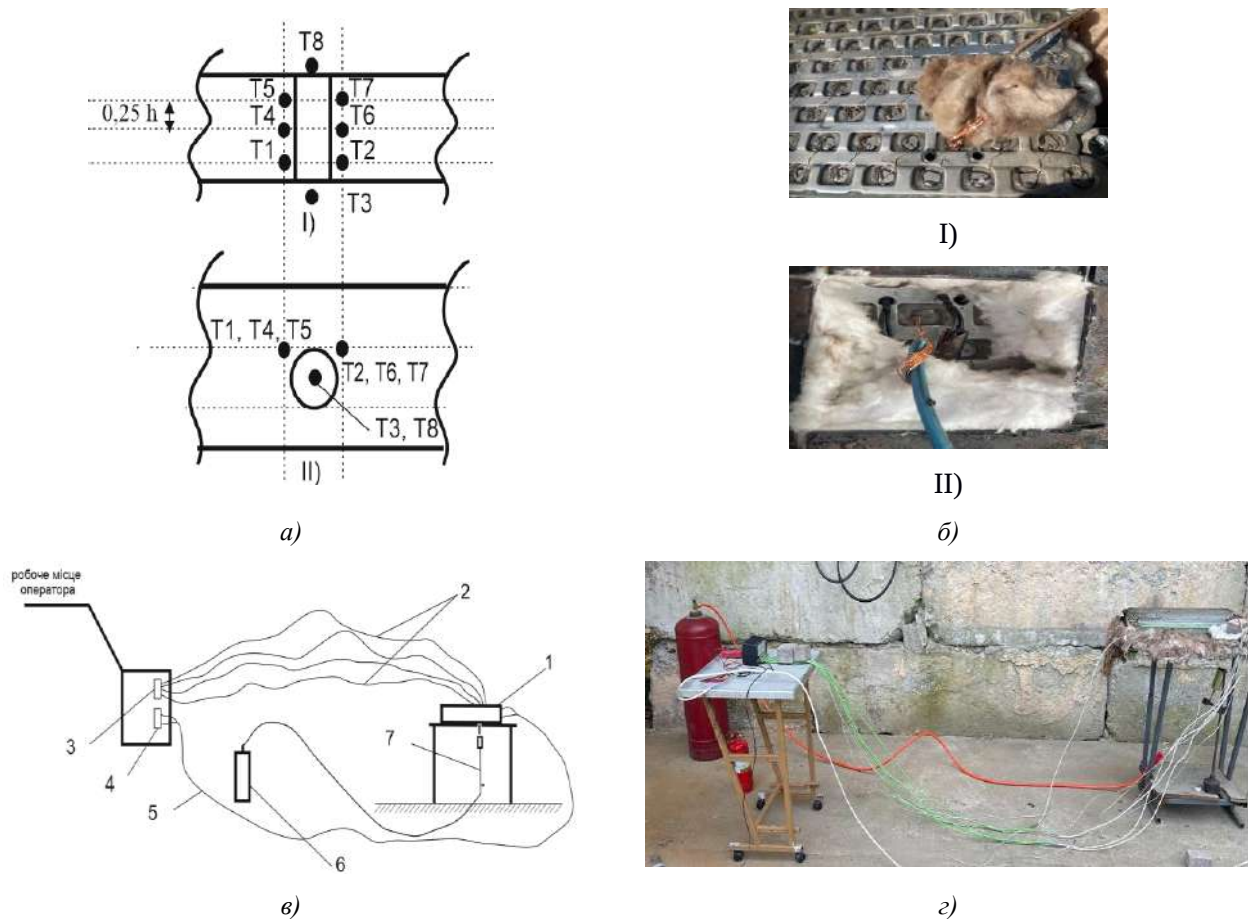


Рисунок 2 – а) схематичне розміщення термопар б) натурний вигляд розміщення термопар
в) схематичне розміщення обладнання та засобів вимірювальної техніки
г) фото перед початком проведення експерименту

Під час проведення експерименту здійснювалась відеофікація. Для відтворюваності експериментальних даних модулі поміщались у вентильовану камеру при температурі 18 °C (+/- 2 °C) на час 20-24 год. Загалом було проведено серію із трьох ідентичних експериментів.

Перед початком проведення досліджень напруга на елементі становила 3,42 В, а температура навколишнього середовища -24 °C.

Результати досліджень та їх обговорення. Оброблені результати експериментальних досліджень наведено на рисунку 3. Динаміку зміни температури елемента літій-іонної силової батареї Tesla model S, який знаходився в складі модуля,

наведено на рисунку 3а. Після запалювання газового пальника термопари T1-T3 відразу фіксують приріст температури. Термопари T4 і T6 фіксують збільшення температури починаючи з 65 с після початку експерименту, а термопари T5 і T7 починаючи з 130 с після початку випробувань. Це пояснюється інерційністю прогрівання модуля АКБ.

Коливання показів на термопарі T1 можна пояснити вітровим впливом на полум'я газового пальника, і, як наслідок, коливання показів на термопарах T2-T3. Впродовж часу проведення експерименту модуль рівномірно нагрівався, а початкова напруга на елементі модуля становила 3,42 В (рис. 3 б).

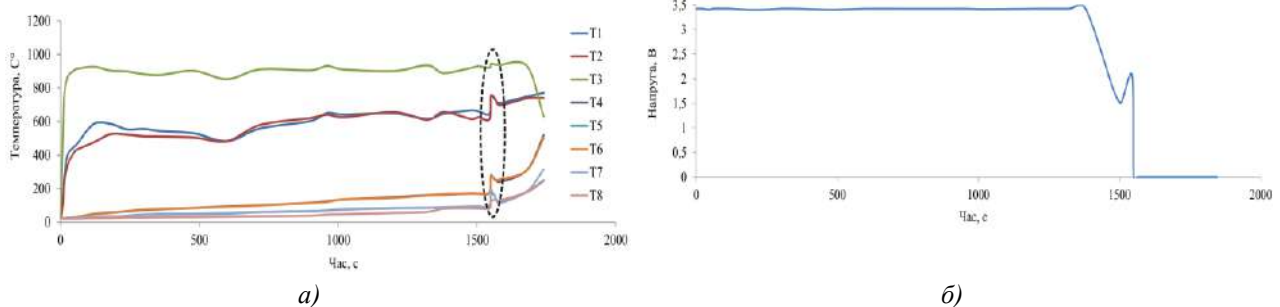


Рисунок 3 – Динаміка зміни: а) температури елемента у модулі літій-іонної батареї: б) напруги на елементі

На 1380 с після початку проведення експерименту цифровий мультиметр почав фіксувати плавне падіння напруги з швидкістю орієнтовно 0,01 В/с. Падіння напруги зумовлене руйнуванням (плавленням) сепаратора і початком виникнення внутрішнього короткого замикання, що призводить до виділення тепла [18]. При цьому температура у нижній частині модуля на термопарах Т1 і Т2 становила 645 і 654 °С відповідно. Термопари Т4 і Т6 фіксували 164 і 167 °С відповідно і у верхній частині модуля температура на термопарі Т5 становить 88 °С, а на термопарі Т7 – 89 °С. На 1480 с напруга становила 1,75 В. Після цього продовж 40 с напруга на елементі зростає досягаючи значення 2,05 В, а термопари Т1 і Т2 фіксують температуру 613 °С і 645 °С. По середині елемента температура становить 172 °С і 170 °С (Т4 і Т6), і на необігріваній стороні елемента температура становить 89 °С і 88 °С (Т5 і Т7). Власне при досягненні 2,05 В на 1545 с після початку проведення експерименту спрацьовує вентиляційний клапан і відбувається викид вентиляційних газів. При цьому напруга різко спадає до 0 В. При викиді відбувається займання і горіння вентиляційних газів, яке тривало 5-6 с. Це спричинило різкий стрибок температури, яку фіксують термопари. Фактично стрибкоподібний приріст температури становить 110-127 °С на усіх термопарах (за винятком Т8). Після завершення горіння газів через 11 с відбулось спрацювання вентиляційного клапана іншого елемента, що також супроводжувалось горінням вентиляційних газів. Чергові спрацювання вентиляційних клапанів інших елементів і подальше їх горіння

відбувалось з інтервалом 10-28 с. При цьому спостерігалась акумуляція теплової енергії, про що свідчать покази термопар Т1, Т2, Т4, Т6. Після спрацювання вентиляційного клапана 4-го елемента було прийнято рішення перекрити подачу пропану у пальник, однак це не припинило розвитку ланцюгової реакції. Спрацювання вентиляційних отворів елементів модуля літій-іонної батареї набуло стохастичного характеру. Особливість стохастичного розвитку полягає у випадкових спрацюваннях вентиляційних отворів елементів, які межують із елементом, в якому викликана екзотермічна реакція (штучно чи природньо). Передбачити порядок спрацювання вентиляційних клапанів елементів з подальшим їх займанням, в масштабі модуля, є складною та невирішеною задачею.

На 1685 с після початку випробування відбулось полум'яне горіння частини модуля. Після цього експеримент припинився та були використанні переносні вогнегасники для гасіння полум'я. З використанням переносного вогнегасника ВП-5 вдалось «збити» полум'я, яким був охоплений модуль. Однак через 7-12 с полум'я з'явилося знову і горіння модуля продовжилось. Після цього для гасіння був використаний вогнегасник ВВК-3,5, де спостерігався схожий ефект, як при застосуванні порошкового вогнегасника. Однак полум'я з'явилося через 22 с після використання такого вогнегасника. Загалом було застосовано три вогнегасники ВП-5 та один ВВК-3,5, але і цього виявилось не достатньо для гасіння модуля, що призвело до повного його вигорання, зовнішнів що і наведено на рисунку 4.



Рисунок 4 – Зовнішній вигляд літій-іонного модуля батареї після проведення експерименту

Варто відмітити, що втрата маси модулів після проведення експериментів становила 33-42 % від початкової їх маси.

Висновки. За результатами натурних вогневих випробувань елементів силової АКБ електромобіля TESLA MODEL S за розробленою методикою отримано такі результати:

1. При дії відкритого полум'я, за умови проведення експерименту, на модуль акумуляторної батареї електромобіля Tesla model S, вентиляційний отвір спрацював на 1545 с після початку проведення експерименту при температурі з обігріваної сторони 613-645 °С, по середині елемента - 175-176 °С та з необігрівальної сторони - 95-96 °С.

2. Перед відкриванням вентиляційного отвору відбувається падіння напруги, що свідчить про руйнування сепаратора та виникнення внутрішнього короткого замикання між анодом та катодом елемента. Очевидно, що такий процес призводить не лише до виникнення теплової енергії, але й до утворення газів у корпусі літій-іонного елемента.

3. Виділення тепла від чотирьох елементів живлення внаслідок перебігу необоротної екзотермічної реакції та викиду вентиляційних газів, за умов проведення експерименту, є достатнім для виникнення ланцюгової реакції та полум'яного горіння власне самого модуля літій-іонної батареї. Подальші спрацювання вентиляційних отворів інших елементів мали стохастичний характер.

Список літератури

1. Zhang J., Yue L., Kong, Q., Liu Z., Zhou X., Zhang C., Chen, L. Sustainable, heat-resistant and flame-retardant cellulose-based composite separator for high-performance lithium ion battery. *Scientific reports*, 2014, 4(1), 3935.

2. Diaz L. B., He X., Hu, Z., Restuccia F., Marinescu M., Barreras J. V., Rein G. Meta-review of fire safety of lithium-ion batteries: Industry challenges and research contributions. *Journal of The Electrochemical Society*, 2020, 167(9), 090559.

3. Liao Z., Zhang S., Li K., Zhang G., Habetler T. G. A survey of methods for monitoring and detecting thermal runaway of lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 2019, 436, 226879.

4. Гаврилюк А. Ф., Кушнір А. П. Аналіз пожежної небезпеки електромобілів за термічною стабільністю силової літійової акумуляторної батареї. *Пожежна безпека*, 2022, 40, 31-39. <https://doi.org/10.32447/20786662.40.2022.04>.

5. Feng X., Ouyang M., Liu X., Lu, L., Xia Y., He X. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review. *Energy storage materials*, 2018, 10, 246-267.

6. Larsson F., Andersson P., Blomqvist P., Lorén A., Mellander B. E. Characteristics of lithium-ion batteries during fire tests. *Journal of Power Sources*, 2014, 271, 414-420.

7. Said A. O., Lee C., Stolarov S. I., Marshall A. W. Comprehensive analysis of dynamics and hazards associated with cascading failure in 18650 lithium ion cell arrays. *Applied Energy*, 2019, 248, 415-428.

8. Lopez C. F., Jeevarajan J. A., Mukherjee P. P. Experimental analysis of thermal runaway and propagation in lithium-ion battery modules. *Journal of the electrochemical society*, 2015, 162(9), A1905.

9. Fang J., Cai, J., He X. Experimental study on the vertical thermal runaway propagation in cylindrical Lithium-ion batteries: Effects of spacing and state of charge. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 197, 117399.

10. Wang H., Shi W., Hu F., Wang Y., Hu X., Li H. Over-heating triggered thermal runaway behavior for lithium-ion battery with high nickel content in positive electrode. *Energy*, 2021, 224, 120072.

11. Liu Y., Niu H., Xu C., Huang X. Thermal runaway propagation in linear battery module under low atmospheric pressure. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 216, 119086.

12. Гаврилюк А., Яковчук Р., Чалий Д., Лемішко М., Тур Н. Визначення протипожежних відстаней під час пожежі Tesla Model S в закритій парковці. *Східно-Європейський журнал підприємницьких технологій*, 2023, 2(10) (122), 39-46. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.277999>

13. Гаврилюк А., Яковчук Р., Балло Ю., Рудик Ю. Теплове моделювання впливу пожежі електромобіля на будівлю паркінгу. *SAE Int. J. Trans. Safety*, 2023, 11(3), doi:10.4271/09-11-03-0013.

14. Kim J. T., Choi J. Y., Kang S., Han N. G., Kim D. K. Development of thermal runaway propagation model considering vent gas combustion for electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 2023, 60, 106535.

15. Kim S. W., Park S. G., Lee E. J. Assessment of the explosion risk during lithium-ion battery fires. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2022, 80, 104851.

16. Гаврилюк А. Ф., Яковчук Р. С., Лемішко М. В. Експериментальні дослідження елементів силової батареї Tesla Model S на предмет пожежної небезпеки. *Пожежна безпека*, 2023, 43, 50-62. DOI:10.32447/20786662.43.2023.07.

17. Lazarenko O., Hembara T., Pospolitak V., Voytovych D. Assessing the effect of mechanical deformation of the panasonic NCR18650B lithium-ion power cell housing on its fire safety. *Східно-Європейський журнал підприємницьких технологій*, 2023, 2(7) (122), 69-78. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.276780>.

18. Willstrand O., Pushp M., Ingason H., Brandell D. Uncertainties in the use of oxygen consumption calorimetry for heat release measurements in lithium-ion battery fires. *Fire Safety Journal*, 2024, 143, 104078.

References

1. Zhang, J., Yue, L., Kong, Q., Liu, Z., Zhou, X., Zhang, C., & Chen, L. (2014). Sustainable, heat-resistant and flame-retardant cellulose-based composite separator for high-performance lithium ion battery. *Scientific Reports*, 4(1), 3935 [in Ukrainian].

2. Diaz, L. B., He, X., Hu, Z., Restuccia, F., Marinescu, M., Barreras, J. V., & Rein, G. (2020). Meta-review of fire safety of lithium-ion batteries: Industry challenges and research contributions. *Journal of The Electrochemical Society*, 167(9), 090559 [in English].

3. Liao, Z., Zhang, S., Li, K., Zhang, G., & Habetler, T. G. (2019). A survey of methods for monitoring and detecting thermal runaway of lithium-

ion batteries. *Journal of Power Sources*, 436, 226879 [in English].

4. Gavryliuk, A. F., & Kushnir, A. P. (2022). Analiz pozhеzhnoi nebezpeky elektromobiliv za termichnoi stabilnistiu sylovoi litiievoi akumuliatornoї batarei [Analysis of the fire hazard of electric vehicles by the thermal stability of a lithium power battery]. *Pozhezhna bezpeka*, 40, 31-39. <https://doi.org/10.32447/20786662.40.2022.04>. [in Ukrainian].

5. Feng, X., Ouyang, M., Liu, X., Lu, L., Xia, Y., & He, X. (2018). Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review. *Energy Storage Materials*, 10, 246-267. [in English].

6. Larsson, F., Andersson, P., Blomqvist, P., Lorén, A., & Mellander, B. E. (2014). Characteristics of lithium-ion batteries during fire tests. *Journal of Power Sources*, 271, 414-420.

7. Said, A. O., Lee, C., Stoliarov, S. I., & Marshall, A. W. (2019). Comprehensive analysis of dynamics and hazards associated with cascading failure in 18650 lithium ion cell arrays. *Applied Energy*, 248, 415-428 [in English].

8. Lopez, C. F., Jeevarajan, J. A., & Mukherjee, P. P. (2015). Experimental analysis of thermal runaway and propagation in lithium-ion battery modules. *Journal of The Electrochemical Society*, 162(9), A1905 [in English].

9. Fang, J., Cai, J., & He, X. (2021). Experimental study on the vertical thermal runaway propagation in cylindrical Lithium-ion batteries: Effects of spacing and state of charge. *Applied Thermal Engineering*, 197, 117399 [in English].

10. Wang, H., Shi, W., Hu, F., Wang, Y., Hu, X., & Li, H. (2021). Over-heating triggered thermal runaway behavior for lithium-ion battery with high nickel content in positive electrode. *Energy*, 224, 120072 [in English].

11. Liu, Y., Niu, H., Xu, C., & Huang, X. (2022). Thermal runaway propagation in linear battery module under low atmospheric pressure. *Applied Thermal Engineering*, 216, 119086 [in English].

12. Gavryliuk, A., Yakovchuk, R., Chalyy, D., Lemishko, M., & Tur, N. (2023). Determination of fire protection distances during a tesla model s fire in

a closed parking lot. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(10 (122)), 39–46. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.277999> [in Ukrainian].

13. Gavryliuk, A., Yakovchuk, R., Ballo, Y., & Ruduk, Y. (2023). Teplove modeliuvannia vplyvu pozhеzhi elektromobilia na budivliu parkinhu [Thermal Modeling of the Electric Vehicle Fire Hazard Effects on Parking Building]. *SAE International Journal of Transportation Safety*, 11(3), 2023, doi:10.4271/09-11-03-0013 [in Ukrainian].

14. Kim, J. T., Choi, J. Y., Kang, S., Han, N. G., & Kim, D. K. (2023). Development of thermal runaway propagation model considering vent gas combustion for electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 60, 106535 [in English].

15. Kim, S. W., Park, S. G., & Lee, E. J. (2022). Assessment of the explosion risk during lithium-ion battery fires. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 80, 104851 [in English].

16. Gavryliuk, A. F., Yakovchuk, R. S., & Lemishko, M. V. (2023). Eksperymentalni doslidzhennia elementiv sylovoi batarei Tesla Model S na predmet pozhеzhnoi nebezpeky [Experimental studies of Tesla Model S power battery elements for fire safety]. *Pozhezhna bezpeka*, 43, 50-62. <https://doi.org/10.32447/20786662.43.2023.07> [in Ukrainian].

17. Lazarenko, O., Hembara, T., Pospolitak, V., & Voytovych, D. (2023). Otsinka vplyvu mekhanichnoi deformatsii korpusu litii-ionnoho elementa zhyvlennia Panasonic NCR18650B na yoho pozhеzhnu bezpeku [Assessing the effect of mechanical deformation of the panasonic NCR18650B lithium-ion power cell housing on its fire safety]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(7 (122)), 69–78. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.276780> [in Ukrainian].

18. Willstrand, O., Pushp, M., Ingason, H., & Brandell, D. (2024). Uncertainties in the use of oxygen consumption calorimetry for heat release measurements in lithium-ion battery fires. *Fire Safety Journal*, 143, 104078 [in English].

© А. Ф. Гаврилюк, Р. С. Яковчук, 2024.

Науково-методична стаття.

Надійшла до редакції 19.04.2024.

Прийнято до публікації 12.06.2024.



М. Я. Карвацька, П. В. Пастухов, О. І. Лавренюк, Б. М. Михалічко

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2659-2724> – М. Я. Карвацька

<https://orcid.org/0000-0002-3140-1101> – П. В. Пастухов

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

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



olaw@ukr.net

КВАНТОВО-ХІМІЧНИЙ АНАЛІЗ АНТИПІРЕНОВОГО ТА ІНГІБУВАЛЬНОГО ВПЛИВУ КУПРУМ(II) ХЛОРИДУ НА ГОРІННЯ НІТРОГЕНВІСНИХ ОРГАНІЧНИХ РЕЧОВИН

Вступ. Проведення систематичних досліджень взаємодії солей *d*-металів, зокрема купрум(II) хлориду, з амінами – це важливий етап на шляху до встановлення механізму антипіренової дії сполук купруму(II) на горіння органічних амінів, які використовують як затвердники епоксидних смол. В цьому плані неорганічні солі купруму(II) мають надзвичайно велику перспективу застосування як антипіренові добавки до епоксидних смол, оскільки вони здатні ефективно призупиняти процеси горіння як органічних амінів, так і епоксіамінних композицій. У свою чергу вплив процесів комплексоутворення на сповільнення горіння органічних амінів відіграє чималу роль і під час інгібування горіння нітрогенвмісних вуглеводнів солями купруму. Втім, сам механізм інгібування горіння органічних вуглеводнів водними розчинами солей купруму(II) має доволі складну природу і визначається хімічним складом внесеного в полум'я розчину солі (тобто схильністю складових частин солі-інгібітора до комплексоутворення) та фізико-хімічними процесами (випаровування, термічної дисоціації, атомізації, іонізації тощо), що відбуваються в полум'ї.

Мета. Квантово-хімічними та термохімічними обчисленнями змодельовати взаємодію *пера* з CuCl_2 з подальшим використанням отриманої інформації для проведення глибокого аналізу змін енергетичного стану реагентів і сполук, які утворюються під час формування металкоординованих епоксіамінних композицій та їхнього горіння.

Методи. Моделювання процесів комплексоутворення, що відбуваються в системі [*пера* – CuCl_2], та їх впливу на зниження горючості отриманих металкоординованих епоксіамінних композицій здійснювали методом DFT, використовуючи обмежений формалізм B3LYP з набором орбітальних базисів 6-31G*.

Результати. В результаті проведених квантово-хімічних обчислень були отримані значення енергій хімічних зв'язків, що виникають в хелатних комплексах, з допомогою яких було здійснено термохімічне моделювання антипіренового впливу CuCl_2 на горючість модифікованих епоксіамінних композицій. Параметри пожежонебезпеки досліджуваних речовин й матеріалів оцінювали за стандартною ентальпією утворення речовин в газоподібному стані та стандартною ентальпією згоряння речовин (або теплотою згоряння).

Висновки. Завдяки квантово-хімічному моделюванню процесів, які протікають під час формування металкоординованих епоксіамінних композицій в системах [ЕД – *пера* – CuCl_2], встановлено, що перебіг процесу структурування супроводжується утворенням хелатного комплексу $[\text{Cu}(\text{eda})_2]\text{Cl}_2$, в координаційному вузлі якого відбувається суттєвий перерозподіл електронної густини між атомом Cu(II) неорганічної солі і атомами N аміну. Цей хелатний комплекс бере участь в структуруванні епоксіамінних композицій як антипірен-затвердник. Доведено, що інкорпорування антипірену-затвердника в епоксиполімерну матрицю сприяє зниженню горючості полімерних матеріалів на основі епоксіамінних композицій, модифікованих CuCl_2 .

Ключові слова: DFT аналіз, епоксіамінні композиції, антипірен-затвердник, інгібітори горіння.

М. Karvats'ka, P. Pastuhov, O. Lavrenyuk, B. Mykhalichko

Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine

QUANTUM CHEMICAL ANALYSIS OF COPPER (II) CHLORIDE'S FLAME RETARDANT AND INHIBITORY EFFECTS ON NITROGEN-CONTAINING ORGANIC SUBSTANCE COMBUSTION

Introduction. Conducting systematic studies of the interaction of *d*-metal salts, in particular copper (II) chloride, with amines is an important step towards establishing the mechanism of flame retardant action of copper (II) compounds on the combustion of organic amines used as hardeners of epoxy resins. In this regard, inorganic salts of copper (II) have

an extremely high prospect of being used as flame-retardant additives to epoxy resins, since they can effectively inhibit the combustion of both organic amines and epoxy-amine compositions. In turn, the effect of complexation processes on slowing the combustion of organic amines plays a significant role in the inhibition of the combustion of nitrogen-containing hydrocarbons with copper salts. However, the mechanism of inhibition of combustion of organic hydrocarbons by aqueous solutions of copper (II) salts is quite complex and is determined by the chemical composition of the salt solution introduced into the flame (i.e., the tendency of the constituent parts of the inhibitor salt to complexation) and the physicochemical processes (evaporation, thermal dissociation, atomization, ionization, etc.) occurring in the flame.

Purpose. To model the interaction of *pepa* with CuCl_2 by quantum chemical and thermochemical calculations and then use the information obtained to conduct an in-depth analysis of changes in the energy state of reagents and compounds during the formation of metal-coordinated epoxy-amine compositions and their combustion.

Methods. The influence of complexation processes occurring in the [*pepa* – CuCl_2] system on the combustibility reduction of the obtained metal-coordinated epoxy-amine compositions was modelled by DFT using the restricted B3LYP formalism with a set of 6-31G* orbital bases.

Results. As a result of quantum chemical calculations, the values of the energies of chemical bonds formed in chelate complexes were obtained, which were used to perform thermochemical modelling of the flame-retardant effect of CuCl_2 on the combustibility of modified epoxy-amine compositions. The combustibility parameters of the studied substances and materials were evaluated by the standard enthalpy of formation of substances in the gaseous state and the standard enthalpy of combustion of substances (or the heat of combustion).

Conclusion. Due to the quantum chemical modelling of the processes that occur during the formation of metal-coordinated epoxy-amine compositions in the [ED – *pepa* – CuCl_2] systems, it was found that the structuring process is accompanied by the formation of a chelated complex $[\text{Cu}(\text{eda})_2]\text{Cl}_2$, in the coordination unit of which there is a significant redistribution of electron density between the Cu(II) atom of the inorganic salt and the N atoms of the amine. This chelate complex is involved in the structuring of epoxy-amine compositions as a flame retardant-hardener. It is proved that the incorporation of a flame retardant-hardener into the epoxy polymer matrix only contributes to the reduction of the combustibility of polymeric materials based on epoxy-amine compositions modified with CuCl_2 .

Keywords: DFT analysis, epoxy-amine compositions, flame retardant-hardener, combustion inhibitor.

Вступ. Систематичні дослідження взаємодії неорганічних солей d-металів, зокрема купрум(II) хлориду, з поліамінами, викликають неабиякий науковий інтерес. Виникнення координаційних зв'язків $\text{Cu(II)} \leftarrow \text{N}$ поряд зі здатністю молекул поліаміну хелатувати атоми Cu(II) слід розглядати як один з найбільш вірогідних механізмів антипіренового впливу сполук купруму(II) на горіння нітрогенвмісних органічних речовин, які, між іншим, використовують як затвердники епоксидних смол. В цьому плані неорганічні солі купруму(II) мають надзвичайно велику перспективу застосування як антипіренові добавки до епоксидних смол, оскільки вони здатні ефективно призупиняти процеси горіння як органічних амінів, так і епоксіамінних композицій.

У свою чергу вплив згаданих процесів комплексоутворення на сповільнення горіння органічних амінів відіграє також чималу роль в процесі інгібування горіння нітрогенвмісних вуглеводнів солями купруму. Втім, сам механізм інгібування горіння органічних вуглеводнів водними розчинами солей купруму(II) має доволі складну природу і визначається хімічним складом внесеного в полум'я розчину солі (тобто схильністю складових частин солі-інгібітора до комплексоутворення) та фізико-хімічними процесами (випаровування, термічної дисоціації, атомізації, іонізації тощо), що відбуваються в полум'ї.

На підставі таких досліджень можна адекватно оцінити енергетичний вплив металовмісних антипіренів на зниження пожежної небезпеки

полімерних матеріалів на основі металкоординованих епоксіамінних композицій та з'ясувати механізм інгібуючої дії солей перехідних металів на процеси горіння нітрогенвмісних вуглеводнів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Результати дослідження антипіренів та інгібіторів горіння на основі сполук металів відображені в низці робіт закордонних дослідників. Зокрема, в ході досліджень було виявлено, що різні оксиди металів або неорганічні солі металів сприяють зниженню горючості та димовиділення при горінні полімерних композицій [1]. Елементи металів можуть каталізувати дегідратацію та розрив ланцюгів полімерної матриці, а також сприяти утворенню стабільних карбонізованих шарів, які ефективно перешкоджають виділенню тепла та диму під час горіння полімерів [2]. Сполуки металів, як правило, вводять в полімерні матеріали шляхом попереднього фізичного змішування з іншими антипіренами. Однак таким сумішам важко виконати необхідні функції у зв'язку з неоднорідністю отриманого матеріалу та малим вмістом сполук металів [3]. Окрім того розглянуті сполуки металів погано суміщаються з полімерним матеріалом, погано диспергуються в полімерній матриці, що часто призводить до погіршення механічних властивостей та ускладнює можливість досягнення необхідної вогнестійкості.

В останні роки увага дослідників спрямована на вивчення впливу металоорганічних координаційних сполук [4, 5] на горючість полімерних матеріалів. В результаті було виявлено,

що органічні ліганди сприяють добрій сумісності цих антипіренів з полімерами та забезпечують їм стійкість до полум'я. В конденсованій фазі сполуки металів, які утворюються в процесі деструкції координаційних сполук, каталізують процеси карбонізації, призводять до формування захисного карбонізованого шару на поверхні полімеру, який запобігає теплопередачі та масообміну обвуглювання, і тим самим пригнічують виділення продуктів термічного розкладання. Крім того, продукти піролізу деяких органічних лігандів можуть утворювати в газовій фазі вільні радикали та негорючі гази (CO_2 , NH_3 , H_2O) [6]. Активні радикали зв'язують вільні радикали кисню і запобігають поширенню полум'я. А негорючі гази знижують концентрацію кисню, а, отже, пригнічують поширення пожежі.

Мета роботи. Для адекватного розуміння процесів, що супроводжують зниження горючості епоксіамінних композицій під впливом неорганічних солей купруму(II), потрібно змоделювати взаємодію *пера* (поліетиленполіамін) – затвердник епоксидних смол, з купрум(II) хлоридом (антипіренова добавка) з подальшим інкорпоруванням отриманого хелатного комплексу $[\text{Cu}(\text{eda})_2(\text{H}_2\text{O})\text{Cl}]\text{Cl}$ [7] (*eda* – $\text{H}_2\text{NC}_2\text{H}_4\text{NH}_2$) у полімерну матрицю епоксидіанової (ЕД) смоли. Здійснити моделювання цих процесів за допомогою квантово-хімічних та термохімічних обчислень, а отриману інформацію використати для проведення глибокого аналізу змін енергетичного стану реагентів і сполук системи $[\text{ЕД} - \text{пера} - \text{CuCl}_2]$, які утворюються під час формування металкоординованих епоксіамінних композицій та їхнього горіння.

Методика обчислень. Квантово-хімічне моделювання процесів хелатування, що відбуваються в системі $[\text{пера} - \text{CuCl}_2]$, та їх впливу на зниження горючості отриманих металкоординованих епоксіамінних композицій здійснювали за допомогою DFT (Density

Functional Theory) аналізу [8]. Обчислення електронної та атомної структури молекулярних, кристалічних та нанокластерних систем проводили за допомогою програми HyperChem версії 8.0.6. [9], використовуючи обмежений формалізм методу B3LYP з набором орбітальних базисів 6-31G*.

Спираючись на обчислені значення енергій хімічних зв'язків, що виникають в хелатних комплексах, здійснено термохімічне моделювання антипіренового впливу CuCl_2 на горючість модифікованих епоксіамінних композицій. Параметри пожежонебезпеки досліджуваних речовин і матеріалів оцінювали за стандартною ентальпією утворення речовин ($\Delta H_{\text{утв}}$, кДж/моль) в газоподібному стані та стандартною ентальпією згоряння речовин ($\Delta H_{\text{зг}}$, кДж/моль) (або теплотою згоряння – $Q_{\text{зг}}$, кДж/кг), які обчислювали за законом Гесса.

Результати та їх обговорення.

Для адекватного трактування механізму впливу неорганічних солей перехідних металів на зниження горючості металкоординованих епоксіамінних композицій був здійснений квантово-хімічний аналіз горючих властивостей отриманих епоксіамінних композицій.

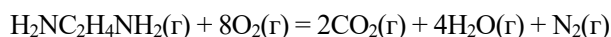
Отримані розрахунковим методом результати були зіставлені з результатами вимірювання температур займання ($t_{\text{з}}$) та самозаймання ($t_{\text{з3}}$) хелатного комплексу $[\text{Cu}(\text{eda})_2(\text{H}_2\text{O})\text{Cl}]\text{Cl}$ та *eda* – затвердника епоксидних смол. Обчислені значення енергій хімічних зв'язків в кластерних фрагментах хелатного комплексу, молекулах *eda* та деяких речовин, які утворюються як продукти термоокисної деструкції затвердників та антипіренів-затвердників, наведені в табл. 1. На основі даних табл. 1, було обчислено стандартну ентальпію утворення ($\Delta H_{\text{утв}}$) антипіренів-затвердників, затвердників та речовин, що утворюються в продуктах реакцій горіння. Значення $\Delta H_{\text{утв}}$ відповідних речовин зведені в табл. 2.

Таблиця 1

Обчислені значення енергій хімічних зв'язків

Кластерні фрагменти	$\Sigma E_{\text{зв}}$, кДж/моль	Хімічні зв'язки	$E_{\text{зв}}$, кДж/моль
$\text{H}_2\text{NC}_2\text{H}_4\text{NH}_2(\text{r})$ (<i>eda</i>)	4118	$\text{O}=\text{O}$ (в O_2)	494
$[\text{Cu}(\text{eda})_2]\text{Cl}_2(\text{r})$	8816	$\text{N}=\text{N}$ (в N_2)	942
Атомізація речовин	$E_{\text{ат}}$, кДж/моль	$\text{H}-\text{H}$ (в H_2)	432
$\text{Cu}(\text{тв}) \rightarrow \text{Cu}(\text{r})$	338	$\text{Cl}-\text{Cl}$ (в Cl_2)	242
$\text{C}(\text{граф}) \rightarrow \text{C}(\text{r})$	715	$\text{H}-\text{Cl}$ (в HCl)	429
		$\text{H}-\text{O}$ (в H_2O)	460
		$\text{C}=\text{O}$ (в CO_2)	801
		$\text{Cu}=\text{O}$ (в CuO)	512

Термохімію цілковитого згоряння газоподібного *eda* у незв'язаному в комплекс стані обчислювали за рівнянням реакції:



Обчислені значення стандартної ентальпії згоряння (ΔH_{32}) *eda*, а також значення теплоти згоряння (Q_{32}), зведені в табл. 3.

Варто звернути увагу на те, що обчислене значення ΔH_{32} для *eda* практично не відрізняється від експериментально визначеного значення ΔH_{32} , яке становить 1868 кДж/моль. Це зайвий раз

засвідчує адекватність процесів, які описуються запропонованою математичною моделлю, реальним процесам, що супроводжують горіння аміних затвердників епоксидних смол у незв'язаному стані. Значення теплоти згоряння *eda* перевищує 2000 кДж/кг, тобто *eda* класифікується як горюча речовина (ДСТУ 8829:2019).

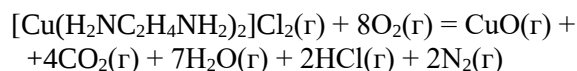
Таблиця 2

Обчислені значення стандартних ентальпій утворення речовин

Кластерні фрагменти	$\Delta H_{утв}$, кДж/моль	Речовини	$\Delta H_{утв}$, кДж/моль
$H_2NC_2H_4NH_2(r)$ (<i>eda</i>)	+17	HCl(r)	-92
$[Cu(eda)_2]Cl_2(r)$	-36	$H_2O(r)$	-242
		$CO_2(r)$	-393
		$CuO(r)$	+320

Взаємодія *eda* з $CuCl_2$ зумовлює утворення хелатного комплексу $[Cu(eda)_2]Cl_2$, якому в процесі формування металкоординованих епоксіамінних композицій відводиться роль антипірена-затвердника. В цій сполуці горючий аміний затвердник утримується негорючою неорганічною сіллю купруму(II) міцними координаційними зв'язками $Cu(II)-N$, що беззаперечно позначається на горючості зв'язаного *eda*.

Щоб краще зрозуміти причини, які зумовлюють зниження горючості модифікованих епоксіамінних композицій, змодельовали термохімічну поведінку зв'язаного в комплекс *eda*. Найбільш вірогідний перебіг реакції горіння антипірена-затвердника представлений рівнянням:



Таблиця 3

Обчислені значення стандартних ентальпій утворення речовин

Речовина	ΔH_{32}° , кДж/моль	Q_{32} , кДж/кг
$H_2NC_2H_4NH_2(r)$ (<i>eda</i>)	-1733	28885
$[Cu(eda)_2]Cl_2(r)$	-3094	12133

Обчислені значення ΔH_{32}° та Q_{32} хелатного комплексу $[Cu(eda)_2]Cl_2$ (табл. 3) показують більш ніж у 2 рази менші значення теплоти згоряння від аналогічних значень для *eda* у вільному, некоординованому стані. На підтвердження змін енергетичного стану координованого *eda* свідчать значення $\Delta H_{утв}^\circ$, обчислені для $[Cu(eda)_2]Cl_2$ в газоподібному стані (див. табл. 2). На відміну від *eda(r)*, значення $\Delta H_{утв}^\circ$ для яких має знак «+», тепловміст при утворенні газоподібного хелатного комплексу суттєво зменшується (значення $\Delta H_{утв}^\circ$ для $[Cu(eda)_2]Cl_2(r)$ має знак «-»). Це пояснюється додатковими хімічними зв'язками, які виникають між *eda* і $CuCl_2$ при утворенні хелатного комплексу. Все це добре узгоджується з результатами експерименту. Так, виміряна температура займання

eda у незв'язаному стані становить 45°C, а температура самозаймання – 410°C. Однак зв'язаний у комплекс *eda* не спроможний зайнятися при досягненні температури 450°C і самозайнятися при 600°C. Отже, легкозаймистий *eda* після взаємодії з $CuCl_2$ стає практично негорючою речовиною.

Для моделювання термохімічної поведінки металкоординованих епоксіамінних композицій в умовах горіння був згенерований кластерний фрагмент як модифікованої (*ЕД/пера*- $CuCl_2$), так і немодифікованої (*ЕД/пера*) епоксіамінних композицій. Хімічний склад та графічні формули відповідних кластерних фрагментів показано на рис. 1, тоді як обчислені для них значення енергій хімічних зв'язків зведено в табл. 4.

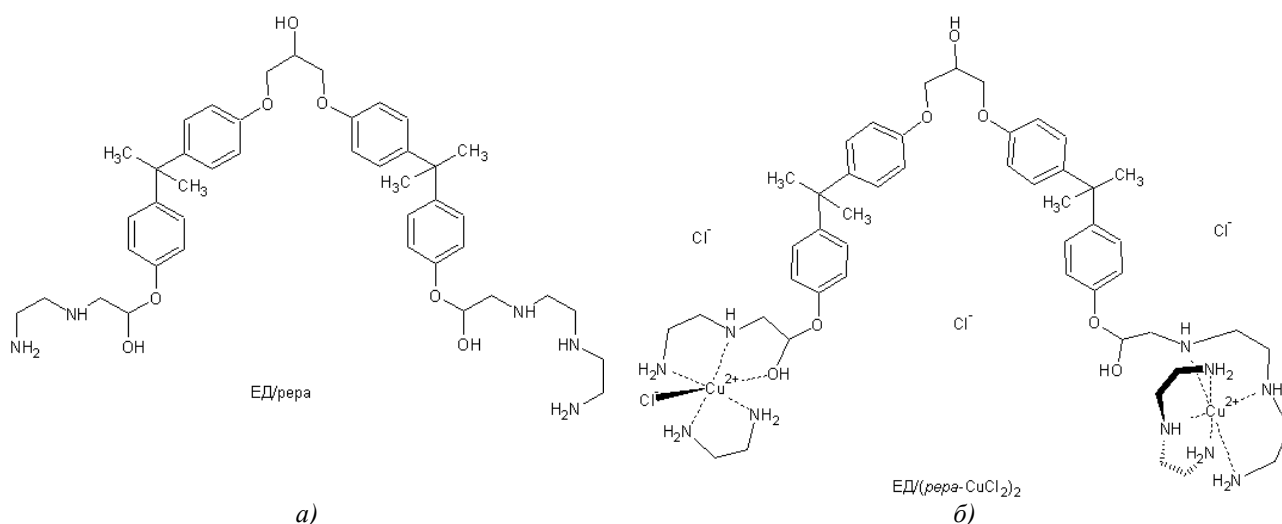


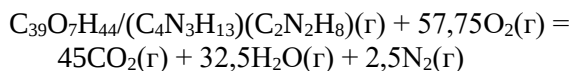
Рисунок 1 – Графічна формула кластера $C_{39}O_7H_{44}/(C_4N_3H_{13})(C_2N_2H_8)$ (а) і $C_{39}O_7H_{44}/([Cu(C_4N_3H_{13})_2]Cl_2)([Cu(C_2N_2H_8)_2Cl]Cl)$ (б)

Таблиця 4

Обчислені значення енергій хімічних зв'язків кластерних фрагментів досліджуваних композицій

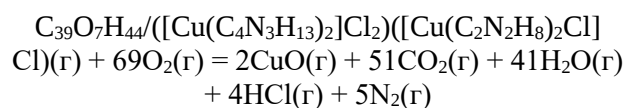
Структурний фрагмент композиції	ΣE_{365} , кДж/моль
$C_{39}O_7H_{44}/(C_4N_3H_{13})(C_2N_2H_8)(r)$	50407
$C_{39}O_7H_{44}/([Cu(C_4N_3H_{13})_2]Cl_2)([Cu(C_2N_2H_8)_2Cl]Cl)(r)$	62796

Перебіг реакції горіння *ЕД/пера* відбувається за рівнянням реакції:



У разі модифікування композиції купрум(II) хлоридом, в *ЕД/пера-CuCl₂* з'являється дванадцять додаткових зв'язків (по одному Cu(II)–Cl та Cu(II)–O і десять координаційних зв'язків Cu(II)–N) (рис. 1 а і б). Тоді горіння *ЕД/пера-CuCl₂*

відбуватиметься за рівнянням:



Результати термохімічних обчислень реакції горіння модифікованої та немодифікованої композицій наведені в табл. 5. Цікаво, що значення $\Delta H_{утв}^\circ$ для *CuCl₂* – координованої епоксіамінної композиції у порівнянні з немодифікованим аналогом суттєво знижуються.

Таблиця 5

Результати термохімічних обчислень горіння епоксіамінних композицій

Композиція	$\Delta H_{утв}^\circ$, кДж/моль	ΔH_{32}° , кДж/моль	Q_{32} , кДж/кг
<i>ЕД/пера</i> (г)	–10,8	–25441	32327
<i>ЕД/пера-CuCl₂</i> (г)	–156	–29537	24211

Важливо зазначити, що обчислена енергія хелатування атомів Cu(II) двома бідентатними молекулами *eda* становить 225,7 кДж. Це звичайно ж позначається на горючих властивостях досліджуваних полімерних композицій. Так, значення Q_{32} , обчислене для *ЕД/пера*(г), значно перевищує 2000 кДж/кг, що дає підстави класифікувати цей полімер як горючий матеріал. Натомість, значення Q_{32} для *ЕД/пера-CuCl₂*(г) суттєво нижче.

Експериментально визначені значення t_3 та t_{c3} для *ЕД/пера*(г) становлять 320°C та 545°C

відповідно. Однак ці ж величини для *ЕД/пера-CuCl₂*(г) дещо зростають. Це узгоджується з обчисленими значеннями Q_{32} (див. табл. 5).

Вплив процесів комплексоутворення на сповільнення горіння нітрогенвмісних органічних речовин відіграє чималу роль і в процесі інгібування горіння нітрогенвмісних вуглеводнів купрум(II) хлоридом. Варто нагадати, що концентрований водний розчин *CuCl₂* виявився вкрай ефективним вогнегасним засобом, який здатний швидко призупиняти поширення полум'я [10]. Причини цього лежать у здатності іонів

перехідних металів (зокрема, Cu^{2+}) зв'язувати активні частинки полум'я в перехідні комплексні утворення. Перш ніж моделювати процес інгібування горіння нітрогенвмісних вуглеводнів купрум(II) хлоридом, розглянемо в загальних рисах, які хімічні частинки формують полум'я при горінні органічних речовин. Як відомо, полум'я складається із трьох зон, які різняться температурою і хімічним складом. В першій зоні (підготовчій) відбувається початкова деструкція горючої речовини, де й формуються хімічні радикали і молекули відновлювальної природи: $\text{C}_2^{\cdot}$, $\text{CN}^{\cdot}$, $\text{CO}^{\cdot}$, $\text{CH}^{\cdot}$, H_2 , $\text{NH}^{\cdot}$. У другій зоні (зоні горіння) відбувається окиснення киснем повітря горючих газів, де переважно існують хімічні радикали окислювальної природи: $\text{H}_3\text{O}^{\cdot}$, $\text{CO}^{\cdot}$, $\text{O}^{\cdot}$, $\text{HO}^{\cdot}$, $\text{NO}^{\cdot}$, $\text{HCO}^{\cdot}$. Власне поява у полум'ї цих радикалів підтверджена спектральними характеристиками [11]. В третій зоні, зоні продуктів згорання, знаходяться продукти горіння – нейтральні молекули H_2O^* і CO_2^* у збудженому стані. Привертає увагу наявність в полум'ї спектральної смуги випромінювання при 306,4 нм, що належить $\text{HO}^{\cdot}$ радикалам, відповідальним за розгалуження ланцюгових реакцій горіння.

Введення в полум'я аерозоллю водного розчину CuCl_2 супроводжується складними фізико-хімічними процесами. При потраплянні дрібних крапель аерозоллю водного розчину CuCl_2 в полум'я спочатку відбувається випаровування води з поглинанням 43,94 кДж тепла і утворенням твердих частинок неорганічної солі. У разі горіння нітрогенвмісного вуглеводню (RN) тверді частинки CuCl_2 хімічно зв'язуються з пароподібними молекулами RN, утворюючи при цьому міцні іонно-молекулярні комплекси $[\text{CuCl}_2(\text{RN})_2]$. При цьому усталена рівновага *рідкий амін* $\rightleftharpoons$ *насичена пара аміну* зміщується в бік зниження концентрації насиченої пари. При досягненні високої температури полум'я процес інгібування горіння вуглеводнів солями купруму переходить у полум'яну фазу. Тоді у полум'ї тверді частинки солі випаровуються, поглинаючи при цьому 213,5 кДж тепла, утворюючи газоподібні молекули, які у випадку купрум(II) хлориду існують у формі плоских димерів Cu_2Cl_4 [12].

Отже, стадія появи молекул Cu_2Cl_4 в полум'ї виявилась визначальною в процесі інгібування горіння вуглеводнів. Саме атоми $\text{Cu}(\text{II})$ плоского фрагменту спроможні координувати радикали $\text{HO}^{\cdot}$, які є відповідальними за розгалуження ланцюгових реакцій горіння вуглеводнів, зв'язуючи їх у радикально-молекулярний комплекс $[\{\text{Cu}(\text{-OH})\text{Cl}_2\}_2]$.

Квантово-хімічні обчислення засвідчили, що дезактивація активних радикалів молекулами

інгібітора відбувається внаслідок перекривання неподіленої електронної пари $2p_z$ -орбіталі атома кисню радикальної частинки $\text{HO}^{\cdot}$ з вільними d^2sp^3 -гібридизованими орбіталями Cu^{2+} молекули Cu_2Cl_4 . При цьому вивільняється енергія у кількості 337 кДж на один утворений координаційний зв'язок $\text{HO}^{\cdot} \rightarrow \text{Cu}^{2+}$. Остаточна дезактивація активних радикалів відбувається внаслідок приєднання протону $\text{H}^{\cdot}$ до частинки $\text{HO}^{\cdot}$ координованої на металічному центрі. При цьому утворюється молекула води і виділяється енергія 435 кДж. Варто зазначити, що максимальна координаційна ємність молекули Cu_2Cl_4 щодо зв'язування радикалів $\text{HO}^{\cdot}$ становить чотири, тобто один моль Cu_2Cl_4 спроможний дезактивувати 4 моля радикалів $\text{HO}^{\cdot}$.

Висновки. Завдяки квантово-хімічному моделюванню процесів, які протікають під час формування купрум(II)-координованих епоксіамінних композицій встановлено, що перебіг процесу структурування супроводжується утворенням хелатного комплексу $[\text{Cu}(\text{eda})_2]\text{Cl}_2$, в якому відбувається перерозподіл електронної густини між атомом $\text{Cu}(\text{II})$ неорганічної солі і атомами N аміну. Доведено, що інкорпорування $[\text{Cu}(\text{eda})_2]\text{Cl}_2$ в епоксиолімерну матрицю сприяє зниженню горючості полімерних матеріалів на основі епоксіамінних композицій модифікованих CuCl_2 .

Для кращого розуміння причин антипіренового впливу солей купруму(II) на горючість епоксіамінних полімерів було змодельовано термохімічні перетворення, які відбуваються з металкоординованими епоксіамінними композиціями в умовах горіння. Шляхом проведених обчислень було встановлено причину антипіренової дії купруму(II) хлориду, суть якої зводиться до утворення додаткових хімічних зв'язків Cu-N , які є відповідальними за зниження горючості металкоординованих епоксіамінних композицій.

Запропоновано механізм інгібування горіння нітрогенвмісних вуглеводнів купрум(II) хлоридом. Процес описується асоціативним механізмом, визначальний елементарний акт якого здійснюється за схемою приєднання активних радикалів полум'я (частинок $\text{HO}^{\cdot}$) до газоподібних молекул Cu_2Cl_4 з утворенням радикально-молекулярного комплексу $[\{\text{Cu}(\text{-OH})\text{Cl}_2\}_2]$ і подальшою його дезактивацією частинками $\text{H}^{\cdot}$.

Список літератури

1. Wang X., Xing W., Feng X., Yu B., Lu H., Song L. et al. The effect of metal oxide decorated graphene hybrids on the improved thermal stability and the reduced smoke toxicity in epoxy resins. Chemical Engineering Journal. 2014. Vol. 250. P. 214–221.
2. Xu B., Wu X., Ma W., Qian L., Xin F., Qiu Y. Synthesis and characterization of a novel organic-

inorganic hybrid char-forming agent and its flame-retardant application in polypropylene composites. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2018. Vol. 134. P. 231–242.

3. Panapitiya N.P., Wijenayake S.N., Huang Y., Bushdiecker D., Nguyen D., Ratanawanate C. et al. Stabilization of immiscible polymer blends using structure directing metal organic frameworks (MOFs). *Polymer*. 2014. Vol. 55 (8). P. 2028–2034.

4. Sang L., Cheng Y., Yang R., Li J., Kong Q., Zhang J. Polyphosphazene-wrapped Fe-MOF for improving flame retardancy and smoke suppression of epoxy resins. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020. Vol. 144 (1). P. 51–59.

5. Wang H., Qiao H., Guo J., Sun J., Li H., Zhang S. et al. Preparation of cobalt-based metal organic framework and its application as synergistic flame retardant in thermoplastic polyurethane (TPU). *Composites Part B: Engineering*. 2020. Vol. 182. P. 1–11.

6. Ye L., Qu B. Flammability characteristics and flame retardant mechanism of phosphate-intercalated hydrotalcite in halogen-free flame retardant EVA blends. *Polymer Degradation and Stability*. 2008. Vol. 93 (5). P. 918–924.

7. Mykhalichko B., Lavrenyuk H., Mykhalichko O. A flame retardant-hardener for epoxy resins: Synthesis, structural, and DFT studies of the $[\text{Cu}(\text{H}_2\text{NC}_2\text{H}_4\text{NH}_2)_2(\text{H}_2\text{O})\text{Cl}]\text{Cl}$ complex. *Turkish Journal of Chemistry*. 2021. Vol. 45(6). P. 1865–1872.

8. Frank L.P. *Elementary Quantum Chemistry*. McGraw-Hill Inc., New York. 1990.

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

10. 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. Vol. 105. No 4. P. 188–195.

11. Gaydon A.G. *The spectroscopy of flame*. Chapman and Hall, London. 1974.

12. Ozkazanc E., Zor S., Ozkazanc H. Structural and dielectric properties of CuCl_2 and ZnCl_2 doped polyaniline. *Polymer Composites*. 2010. Vol. 31(11). P. 1862–1868.

Reference

1. Wang X., Xing W., Feng X., Yu B., Lu H., Song L. et al. (2014) The effect of metal oxide decorated graphene hybrids on the improved thermal stability and

the reduced smoke toxicity in epoxy resins. *Chemical Engineering Journal*. Vol. 250. P. 214–221.

2. Xu B., Wu X., Ma W., Qian L., Xin F., Qiu Y. (2018) Synthesis and characterization of a novel organic-inorganic hybrid char-forming agent and its flame-retardant application in polypropylene composites. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. Vol. 134. P. 231–242.

3. Panapitiya N.P., Wijenayake S.N., Huang Y., Bushdiecker D., Nguyen D., Ratanawanate C. et al. (2014) Stabilization of immiscible polymer blends using structure directing metal organic frameworks (MOFs). *Polymer*. Vol. 55 (8). P. 2028–2034.

4. Sang L., Cheng Y., Yang R., Li J., Kong Q., Zhang J. (2020) Polyphosphazene-wrapped Fe-MOF for improving flame retardancy and smoke suppression of epoxy resins. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. Vol. 144 (1). P. 51–59.

5. Wang H., Qiao H., Guo J., Sun J., Li H., Zhang S. et al. (2020) Preparation of cobalt-based metal organic framework and its application as synergistic flame retardant in thermoplastic polyurethane (TPU). *Composites Part B: Engineering*. Vol. 182. P. 1–11.

6. Ye L., Qu B. (2008) Flammability characteristics and flame retardant mechanism of phosphate-intercalated hydrotalcite in halogen-free flame retardant EVA blends. *Polymer Degradation and Stability*. Vol. 93 (5). P. 918–924.

7. Mykhalichko B., Lavrenyuk H., Mykhalichko O. (2021) A flame retardant-hardener for epoxy resins: Synthesis, structural, and DFT studies of the $[\text{Cu}(\text{H}_2\text{NC}_2\text{H}_4\text{NH}_2)_2(\text{H}_2\text{O})\text{Cl}]\text{Cl}$ complex. *Turkish Journal of Chemistry*. Vol. 45(6). P. 1865–1872.

8. Frank L.P. (1990) *Elementary Quantum Chemistry*. McGraw-Hill Inc., New York.

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

10. Mykhalichko B., Lavrenyuk H., Mykhalichko O. (2019) New water-based fire extinguishant: Elaboration, bench-scale tests, and flame extinguishment efficiency determination by cupric chloride aqueous solutions. *Fire Safety Journal*. Vol. 105. No 4. P. 188–195.

11. Gaydon A.G. *The spectroscopy of flame*. Chapman and Hall, London. 1974.

12. Ozkazanc E., Zor S., Ozkazanc H. (2010) Structural and dielectric properties of CuCl_2 and ZnCl_2 doped polyaniline. *Polymer Composites*. Vol. 31(11). P. 1862–1868.

© М. Я. Карвацька, П. В. Пастухов,
О. І. Лавренюк, Б. М. Михалічко, 2024.

Науково-методична стаття.

Надійшла до редакції 01.04.2024.

Прийнято до публікації 12.06.2023.



*Б. М. Ковалишин¹, Я. В. Балло¹, В. В. Ніжник¹,
І. Г. Стилик¹, О. І. Кагітін²*

¹Інститут державного управління та наукових досліджень
з цивільного захисту, м. Київ, Україна

²Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6433-8826> – Б. М. Ковалишин

<https://orcid.org/0000-0002-9044-1293> – Я. В. Балло

<https://orcid.org/0000-0003-3370-9027> – В. В. Ніжник

<https://orcid.org/0000-0002-8474-2014> – І. Г. Стилик

<https://orcid.org/0000-0002-2482-8422> – О. І. Кагітін

2801397@ukr.net



ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОБМЕЖЕННЯ ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ ПО ЗОВНІШНІХ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЯХ

Проблема. Протипожежні карнизи застосовуються, як один із найефективніших засобів обмеження поширення пожежі по зовнішніх огороджувальних конструкціях будівель. Простота конструкції протипожежного карнизу та відносно недорога вартість його влаштування дозволяє широко використовувати даний тип фасадної протипожежної перешкоди в сучасних технологіях будівництва. Разом із тим, аналіз попередніх досліджень демонструє, що пряма форма протипожежного карниза створює передумови для виникнення негативних явищ, пов'язаних із характером поширення полум'я на вищерозташовані поверхи. Таким чином постає питання розглянути перспективні напрями підвищення ефективності обмеження пожежі по зовнішніх огороджувальних конструкціях шляхом застосування протипожежних карнизів, які можуть не тільки обмежувати пожежу та її небезпечні чинники, але і відводити їх від площини фасаду у простір.

Мета роботи – визначення перспективних напрямків підвищення ефективності обмеження пожежі по зовнішніх огороджувальних конструкціях за допомогою протипожежних карнизів.

Методи дослідження. Під час проведення роботи використано аналітичний метод досліджень для проведення аналізу актуальних джерел інформації щодо параметрів, структури, інших характеристик досліджуваного об'єкта. Також використано теоретичні методи дослідження, що передбачало вивчення сучасних наукових публікацій, нормативних документів та технічної літератури за напрямком дослідження.

Основні результати дослідження. Приведено та систематизовано основні типи фасадних систем та проаналізовано потенційні можливості застосування відповідних фасадних протипожежних перешкод для обмеження зовнішніх пожеж у будівлях. Запропоновано перспективні шляхи підвищення ефективності протипожежних карнизів, а саме представлено гіпотезу, що протипожежні карнизи можуть не тільки обмежувати пожежу та її небезпечні чинники, але і відводити їх від площини фасаду будівлі у простір, тим самим знижуючи потенційно небезпечний вплив зовнішньої пожежі. Відзначено проблемні аспекти оцінювання ефективності обмеження поширення пожежі ззовні будівлі та перелік критеріїв, які можливо застосовувати під час оцінювання ефективності протипожежних карнизів різних типів.

Висновки. Проведено аналіз типів фасадних систем, які доцільно обладнувати фасадними протипожежними перешкодами з врахуванням їх об'ємно-конструктивних параметрів та існуючим типам протипожежних карнизів. Приведено переваги пасивних та активних фасадних протипожежних перешкод та відзначено можливі напрями підвищення ефективності їх застосування під час будівництва. Визначено та обґрунтовано шляхи підвищення ефективності обмеження поширення пожежі по фасадах будівель шляхом застосування більш досконалих протипожежних карнизів з обтічною формою для відведення теплового потоку та небезпечних чинників пожежі від зони фасаду.

Ключові слова: обмеження поширення пожежі по фасадах, протипожежні карнизи, системи протипожежного захисту, підвищення ефективності фасадних протипожежних перешкод, пожежна безпека.

PROSPECTIVE DIRECTIONS OF IMPROVING THE EFFICIENCY OF RESTRICTIONS FIRE ON EXTERNAL ENCLOSURE STRUCTURES

Formulation of the problem. Today, fire-resistant eaves are used as one of the most effective means of limiting the spread of fire on the external enclosing structures of buildings. The simplicity of the design of the fire curtain and the relatively inexpensive cost of its installation allow this type of facade fire barrier to be widely used in modern construction technologies. At the same time, the analysis of previous studies shows that the direct form of the fire eaves creates prerequisites for the occurrence of negative phenomena related to the nature of the spread of the flame to the higher floors. Thus, the question arises to consider prospective ways of increasing the effectiveness of fire limitation on external enclosing structures by using fire-resistant eaves, which can not only limit fire and its dangerous factors but also divert them from the plane of the facade into space.

The purpose of the work is to identify promising directions for increasing the effectiveness of fire prevention on external fencing structures using fire eaves.

Research methods. During the work, an analytical research method was used to analyse relevant sources of information regarding the parameters, structure, and other characteristics of the object under study. Theoretical research methods were also used, which involved the study of modern scientific publications, regulatory documents and technical literature in the field of research.

The main results of the study. The main types of facade systems are presented and systematized, and the potential possibilities of using appropriate facade fire barriers to limit external fires in buildings are analysed. Prospective ways of increasing the effectiveness of fire eaves are proposed, namely the hypothesis that fire eaves can not only limit fire and its dangerous factors but also divert them from the plane of the facade of the building into space, thereby reducing the potentially dangerous influx of external fire. Problematic aspects of evaluating the effectiveness of limiting the spread of fire from outside the building and a list of criteria that can be used when evaluating the effectiveness of fire eaves of various types are noted.

Conclusions. An analysis of the types of facade systems, which should be equipped with facade fire barriers, taking into account their volumetric and structural parameters and the existing types of fire eaves, was carried out. The advantages of passive and active facade fire barriers are given, and the possible directions for increasing the efficiency of their use during construction are noted. The ways of achieving an increase in the effect of limiting the spread of fire on the facades of buildings by using more advanced fireproof eaves with a streamlined shape to divert heat flow and dangerous fire factors from the facade area have been determined and substantiated.

Keywords: limiting the spread of fire on facades, fire eaves, fire protection systems, increasing the effectiveness of facade fire barriers, fire safety.

Постановка проблеми.

Попередні дослідження ефективності обмеження поширення пожежі по зовнішніх огорожувальних конструкціях будівель показав, що протипожежні карнизи, як фасадні протипожежні перешкоди пасивного типу, є досить ефективним протипожежним засобом, який має ряд переваг порівняно із такими фасадними протипожежними системами активного типу, як дренчерні завіси [1-2]. Аналіз досвіду застосування існуючих типів протипожежних карнизів у світі демонструє, що на сьогодні не існує єдиного системного підходу до застосування тих чи інших видів протипожежних карнизів для захисту від поширення пожеж по фасадах будівель, що можуть бути виконані із будівельних матеріалів із різними показниками пожежної небезпеки [3-5]. Вимоги чинних нормативних документів, як вітчизняних [6-7], так і зарубіжних [8] в цілому зводяться до визначення фактичної необхідності застосування протипожежних карнизів певної ширини для будівель із різною умовною висотою. При цьому фактично відсутня можливість реалізації

параметричного методу нормування застосування протипожежних карнизів, як протипожежного елемента, геометричні характеристики якого (ширина, висота, форма) можуть впливати на ефективність його застосування. Врахування визначених параметрів, їх систематизація та визначення їх ефективності дасть змогу не тільки забезпечити умови ефективного обмеження поширення пожежі по зовнішнім огорожувальних конструкціях, але і визначити умови за яких ті чи інші параметри протипожежних карнизів мають більшу значущість для забезпечення досягнення визначених умов безпеки, а також дасть можливість отримати позитивний економічний ефект від їх застосування.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Дослідження, що представлені в роботі [9], містять ґрунтовний аналіз впливу протипожежного карниза на процеси обмеження поширення пожежі, який заснований на дослідженнях наслідків реальної пожежі, що виникла у висотній будівлі. Разом із цим, робота [9] не розкриває питання виявлення закономірностей запобігання

поширенню пожежі по фасаді будівлі, які можливо виявити в разі застосування протипожежних карнизів із більш ефективними формами та геометричними розмірами. Дослідження [10], які лягли в основу теорії поширення вогню крізь світлові отвори та описані в [11], стали основоположними в частині дослідження процесів поширення пожежі крізь зовнішні огорожувальні конструкції, проте на сьогодні відсутні дані щодо забезпечення її ефективного обмеження за допомогою фасадних протипожежних перешкод різних типів та форм. В роботі [12] досліджуються питання підвищення ефективності обмеження поширення пожежі по фасаді будівлі залежно від

висоти влаштування протипожежного карниза відносно краю вікна приміщення, де може виникнути пожежа. Проте цей чинник є лише одним із ряду численних параметрів, які можуть впливати на підвищення ефективності обмеження фасадної пожежі.

В роботах [13-14] досліджується питання ефективності обмеження поширення пожежі за допомогою протипожежних карнизів шириною 10 та 30 см, проте дослідження [15] доводять, що ефективність протипожежних карнизів щодо обмеження температурного впливу на фасад вище розташованого поверху починається з ширини 300-400 мм, що продемонстровано на рисунку 1.

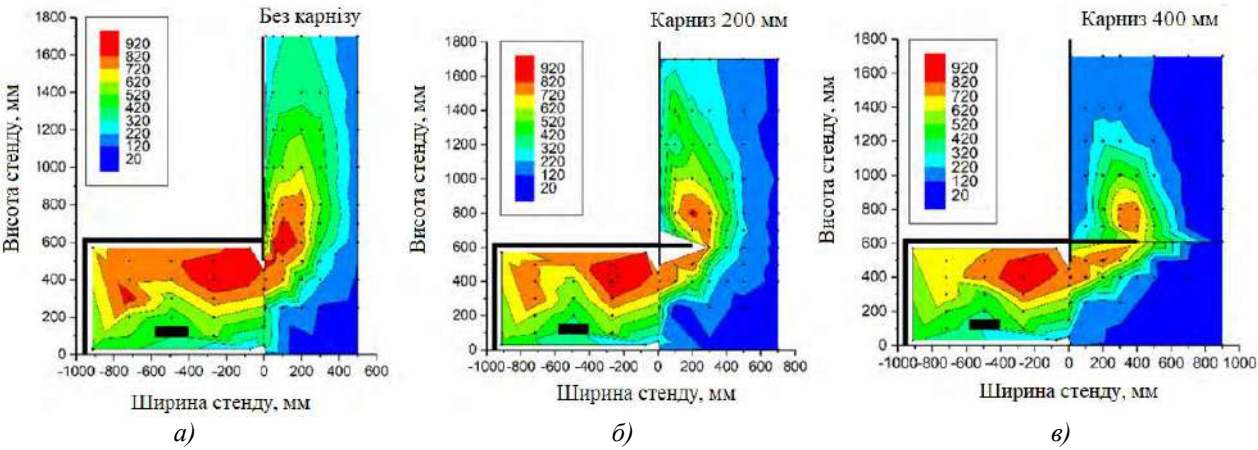


Рисунок 1 – Схема поширення пожежі та характеру температурних впливів під час застосування протипожежних карнизів різного типу, де:
а – поширення пожежі за відсутності протипожежного карниза;
б – поширення пожежі при наявності протипожежного карниза шириною 200 мм;
в – поширення пожежі при наявності протипожежного карниза шириною 400 мм

Окремо слід відзначити дослідження [16], які дали змогу систематизувати та узагальнити вимоги європейських нормативних документів та рекомендацій щодо влаштування протипожежних

карнизів на зовнішніх огорожувальних конструкціях будівель у комбінації із міжповерховими віконними простінками. Зазначені дані наведено в таблиці 1. (таблиця 6).

Таблиця 1

Вимоги європейських країн щодо влаштування протипожежних карнизів та міжповерхових віконних простінків на фасадах висотних будівель

Країна	Мінімальна висота міжповерхового віконного простінку, м	Мінімальна ширина протипожежного карниза, м	Примітки
Австралія	0,9	0,5	- виконаний із негорючих матеріалів з класом вогнестійкості не нижче REI 60; - ширина протипожежного карниза має бути не менше 450 мм
Фінляндія	1,0	-	додаткові вимоги відсутні
Франція	0,6-1,3	0,6-1,3	додаткові вимоги відсутні
Китай	0,9	0,5	розміри горизонтальної проекції міжповерхового простінку та ширини протипожежного карниза залежать від ряду змінних вимог

Нова Зеландія	1,5	0,6	клас вогнестійкості цих конструкцій повинен бути не нижчим за клас вогнестійкості зовнішньої стіни
Норвегія	1,2	1,2	присутній перелік взаємних комбінацій геометричних параметрів цих конструкцій
Португалія	1,1	1,1	ці вимоги допускається не виконувати, якщо будівля містить автоматичну спринклерну систему пожежогасіння
Іспанія	1,0	1,0	мають бути виконані із негорючих матеріалів з класом вогнестійкості не нижче REI 60
Швеція	1,2	1,2	прістінок має бути виконаний із негорючих матеріалів з класом вогнестійкості не нижче EI 60
Україна	-	0,75-1,5	мають бути виконані із негорючих матеріалів з класом вогнестійкості не нижче EI 60
США	0,914	0,762	- вертикальна та горизонтальна відстані між вікнами мають бути не менше 1524 мм; - мають бути виконані із негорючих матеріалів з класом вогнестійкості не нижче EI 60

Дослідження, представлені в [17], значно ґрунтовніше аналізують проблему використання протипожежних карнизів у різних країнах, проте в цій роботі, більшою мірою розкриваються проблеми визначення значення пожежної навантаги всередині приміщень, яке слід приймати під час проведення випробувань та тривалість пожежі. Також в цій роботі наведено порівняльні дані експериментальних досліджень щодо потенційного впливу пожежі для будівель із різними геометричними параметрами вікон, а також можливість використання балконів в якості фасадних протипожежних перешкод. Разом із цим, питання впливу форми протипожежного карниза на процеси більш ефективного відведення теплового потоку та вогню від вище розташованої частини фасаду будівлі залишаються не розкритими.

Таким чином, на основі аналізу попередніх досліджень, а також виявлених недоліків та актуальних проблемних питань сформульовано мету роботи та задачі досліджень, які слід вирішити.

Мета роботи полягає у визначенні перспективних напрямків підвищення ефективності обмеження пожежі по зовнішніх огорожувальних конструкціях за допомогою протипожежних карнизів.

Для досягнення поставленої мети слід:

- здійснити аналіз типів фасадних систем, які доцільно обладнувати протипожежними карнизами;
- визначити та узагальнити за об'ємно-конструктивними параметрами типи протипожежних карнизів;

- здійснити аналіз найбільш значущих чинників, які можуть впливати на підвищення ефективності обмеження поширення пожежі на вище розташований поверх при застосуванні протипожежних карнизів;

- визначити критерії, які можуть характеризувати ефективність протипожежного карниза певного типу;

Методи дослідження. В роботі було використано методи узагальнення раніше виконаних досліджень щодо аналізу ефективності застосування протипожежних карнизів, метод аналітичного дослідження, методи порівняння та аналогії.

Виклад основного матеріалу. На сьогодні в Україні основоположним документом, який регулює влаштування фасадних систем різного типу є [18]. Ці будівельні норми визначають три основні типи схем конструктивного виконання збірної фасадної системи, а саме:

- тип А1, збірна система з опорядженням із легкої штукатурками;

- тип А2, збірна система з опорядженням із товстошаровими штукатурками;

- тип Б1, збірна система із стояковим кріпленням зовнішнього опоряджувального захисного шару;

- тип Б2, збірна система із стояково-ригельним кріпленням зовнішнього опоряджувального захисного шару;

- тип В1, збірна система з комбінованим світлопрозорим фасадом;

- тип В2, збірна система з суцільним світлопрозорим фасадом із термоізоляцією плит перекриттів.

Слід відзначити, що вимоги [18] передбачають, що всі наведені типи збірної фасадної системи можуть використовуватися у будівлях з умовною висотою вище 47 м, тобто у будівлях, які слід розділяти на вертикальні протипожежні відсіки та відповідно слід обладнувати протипожежним карнизом. Вимоги [19] передбачають, що крім

протипожежних карнизів допускається приймати інші планувальні, конструктивні та інженерні рішення, які забезпечують непоширення пожежі між протипожежними відсіками по фасаді будівлі за висотою. Як приклад, для фасадів типу В2, як правило замість протипожежних карнизів використовують системи дренчерного водяного екранування із застосуванням мережі сухотрубів та дренчерних зрошувачів із напрямною лопаткою. Також, серед пасивних систем забезпечення обмеження поширення пожежі по фасадах на вище розташовані поверхи може бути заповнення світлових конструкцій скляними конструкціями із визначеним необхідним класом вогнестійкості.



а)



б)

Рисунок 2 – приклад кінетичного фасаду, де:

а – вигляд механізму, що приводить в дію рухомі елементи фасаду;

б – зовнішній вигляд кінетичного фасаду морського вокзалу Одеського морського порту

Слід відзначити, що недоліком активних протипожежних фасадних систем, а саме дренчерних систем водяного екранування та кінетичних (динамічних) фасадів є складність реалізації таких систем і підтримання їх експлуатаційної придатності. Окрім цього, існує питання економічної складової, як на етапі загальної початкової вартості будівництва, так і забезпечення подальшого регламентного обслуговування таких фасадних систем.

Серед переваг пасивних фасадних протипожежних систем, а саме протипожежних карнизів, протипожежних віконних штор та протипожежних поясів, є відносна простота їх конструкцій, а також відсутність особливих вимог до підтримання їх експлуатаційних показників, при цьому, фактично основною вимогою, яка висувається до таких систем, є забезпечення збереження їх цілісності в частині вогнестійкості.

Окремим питанням є напрями підвищення ефективності застосування фасадних протипожежних перешкод. Для дренчерних систем водяного екранування можливо досягти підвищення ефективності щодо обмеження поширення пожежі зовні фасаду завдяки

підвищенню інтенсивності зрошення, застосування більш ефективних моделей зрошувачів або ефективніших водних вогнегасних розчинів. Для кінетичних (динамічних) фасадів, підвищення ефективності в частині обмеження поширення пожежі по фасадах будівлі є більш складним, оскільки, як правило, такі фасади є індивідуальним технічним рішенням, спрямованим на розвиток будівельних технологій і дизайну.

На сьогодні для протипожежного карниза фактично єдиним об'ємно-конструктивним параметром, який впливає на його ефективність, є його ширина, при цьому не розглядаються питання впливу його форми на процеси обмеження поширення пожежі. Гіпотезою досліджень є те, що карниз може не тільки обмежувати пожежу та її небезпечні чинники, але і відводити їх від площини фасаду у простір. В основі цього явища можуть лежати процеси завихрення турбулентних течій теплового потоку, а ступінь впливу його дії на об'єкт залежить від форми тіла і його орієнтації відносно набігаючого теплового потоку від пожежі [21].

Дослідження [22], які присвячені комп'ютерному моделюванню аеродинамічних потоків, що поширюються навколо кубічної

конструкції на фасаді будівель, демонструють, що прямі форми та гострі ребра конструкцій спричиняють виникнення зони повторного приєднання теплового потоку вздовж площини фасаду, яка розташовується в середньому на (X_F)

1,69 відстані відносно значення ширини прямої перешкоди. На рисунку 3 наведено візуалізацію цієї моделі згідно з дослідженням [22], де червоним кольором позначено місце розташування зони повторного приєднання теплового потоку.

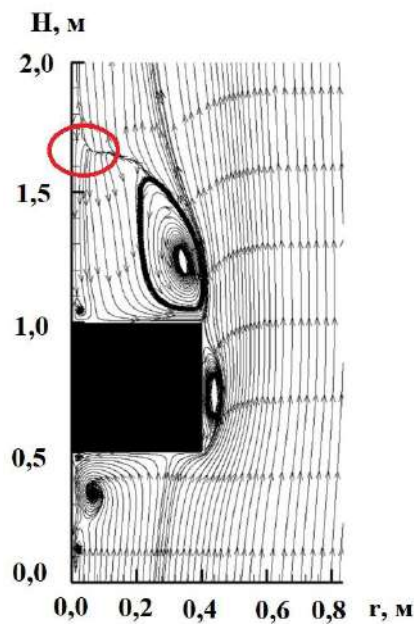


Рисунок 3 – Аеродинамічна модель поширення теплового потоку вздовж фасаду будівлі, обладнаного фасадною перешкодою прямої форми

Представлені дослідження, на жаль, не розкривають питання визначення взаємозалежних чинників, які впливають на процес запобігання даному явищу. А саме, станом на сьогодні не виявлені закономірності впливу ширини протипожежного карниза, при якій явище повторного приєднання теплового потоку почне втрачати свій ефект та створювати негативний вплив для вище розташованих огорожувальних

конструкцій. Для уникнення чи зменшення негативного явища повторного приєднання теплового потоку до фасаду будівлі можна використовувати протипожежні карнизи із альтернативною формою їх конструкції. На рисунку 4 наведено приклади можливих форм протипожежних карнизів для зниження ефекту повторного приєднання теплового потоку до фасаду будівлі.

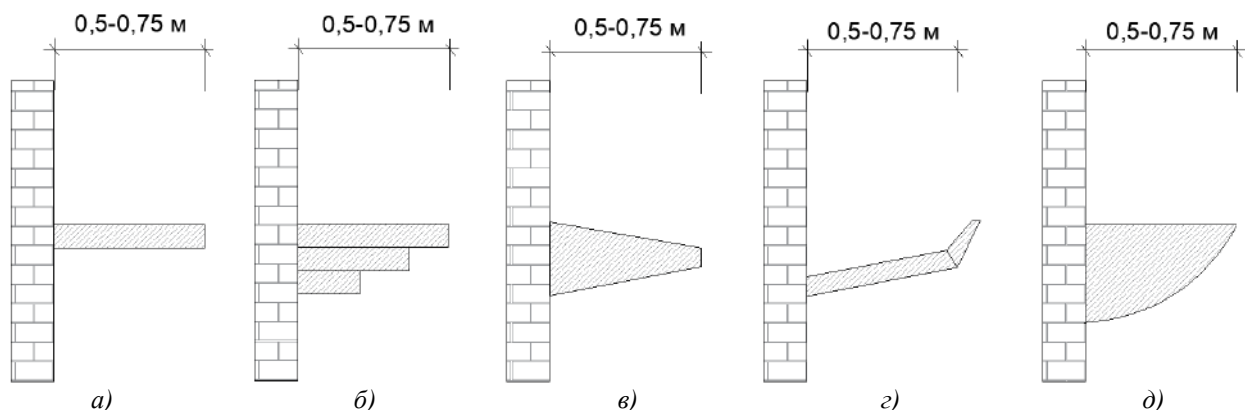


Рисунок 4 – Зовнішній вигляд протипожежних карнизів: де а) – стандартний протипожежний карниз прямої форми; б) – протипожежний карниз трикутної форми; в) – протипожежний карниз у формі трапеції; г) – протипожежний карниз у формі «вінглету» д) – протипожежний карниз обтічної форми півкола

Важливо зазначити, що явище повторного приєднання теплового потоку та самого полум'я

до вище розташованої зовнішньої огорожувальної конструкції може створити

більш небезпечні умови руйнування фасадної системи в цій зоні ніж при рівномірному розподілі небезпечних чинників пожежі. Аналогічне явище можна спостерігати для протипожежних карнизів прямокутної форми, а саме для нижньої зони примикання карниза до зовнішньої огорожувальної конструкції через створення завихрення полум'я. Обмеження, а не відведення небезпечних чинників пожежі створює передумови утворення температурного режиму в зоні фасаду, який значно перевищує показники стандартного температурного режиму, згідно із яким проводять більшість випробувань, щодо пожежної безпеки фасадних систем та їх матеріалів облицювання.

Серед проблемних питань реалізації запропонованих конструктивних рішень слід відзначити складність можливості відтворення складних форм протипожежних карнизів у порівнянні із простим виступом прямої форми, який зазвичай є продовженням міжповерхового перекриття. Окрім цього, серед базових параметрів, які характеризують їх спроможність обмежувати поширення пожежі зовні фасадів будівель, є їх ширина та клас вогнестійкості за граничними станами втрати цілісності (умовна позначка E) та теплоізолювальної здатності (умовна позначка I), при цьому мінімальна межа вогнестійкості повинна становити не менше 90 хв, що визначено у [7;19].

Слід відзначити, що показник граничного стану втрати теплоізолювальної здатності (I) є важливим параметром для протипожежних перешкод всередині приміщень будівлі для забезпечення обмеження поширення пожежі всередині її об'єму. Проте, для протипожежного карниза, що лише виступає за межі фасаду будівлі по контуру будівлі на межі протипожежних відсіків, в більшій мірі відводиться роль штучного бар'єра, який не може повністю забезпечити ізоляцію поширення небезпечних чинників пожежі на вище розташовані поверхи. Тобто, такі протипожежні перешкоди, як стіни, перегородки, перекриття, повноцінно розділяють внутрішній об'єм споруди, а в разі наявності прорізів в їх конструкції, передбачається влаштування відповідного заповнення прорізів у протипожежних перешкодах (протипожежні двері, вікна, завіси) з відповідним класом вогнестійкості. Для протипожежних карнизів, розміщених зовні будівлі, вимога щодо теплоізолювальної здатності (I) їх конструкції не може бути справедливою, оскільки ширина їх виступу 0,75 м чи 1,5 м не може повноцінно забезпечити обмеження поширення полум'я на вище розташовані поверхи.

Враховуючи вище наведене, ця характеристика протипожежного карниза в перспективі може бути замінена іншими критеріями забезпечення

обмеження поширення пожежі або її небезпечних чинників на вище розташовані поверхи будівлі, при цьому, безумовно слід забезпечити виконання такої умови, як збереження цілісності його конструкції.

Важливим етапом оцінювання підвищення ефективності протипожежних карнизів з різними об'ємно-конструктивними характеристиками є визначення логічного переліку критеріїв, щодо забезпечення обмеження пожежі.

Серед таких критеріїв можна використовувати оцінку критичного значення площі прогріву фасаду, який розташовується вище поверху, де відбувається пожежа. При цьому, можна визначити критичне значення ширини прогріву вище розташованої частини фасаду і її висоти. Такий критерій є важливим при врахуванні сценарію, коли пожежа виникає безпосередньо зовні фасаду, зокрема через пожежу зовнішніх кондиціонерних блоків. Визначення граничних умов поширення зовнішньої пожежі на певну площу фасаду дає змогу оцінити можливість поширення пожежі через світлові прорізи усередину приміщення вище розташованих поверхів та відповідно передбачити ефективні протипожежні заходи.

Аналогічним критерієм умови безпеки може бути досягнення критичного значення температури для поверхні фасаду, особливо якщо в його конструкції використовується горючий облицювальний матеріал. При використанні горючих облицювальних матеріалів також можливо враховувати умови їх руйнування (обсипання), що також може впливати на безпеку пожежно-рятувальних підрозділів.

Також, під час проведення аналізу ефективності заходів щодо обмеження поширення пожежі можливо оцінювати обмеження фактичної висоти полум'я або здійснювати порівняльний аналіз критичного значення теплового потоку. Як приклад, згідно з методом SP Fire 105 [22] критичне значення теплового потоку не повинно перевищувати значення 80 кВт/м^2 на рівні поверху, який розташований над поверхом пожежі. Окрім цього, в якості критеріїв оцінювання можна розглядати комплексне оцінювання із застосуванням усіх названих критеріїв.

Висновки. На основі аналізу існуючих засобів обмеження поширення пожежі по зовнішніх огорожувальних конструкціях, що використовуються за кордоном та в Україні, визначено та систематизовано основні їх типи та проаналізовано потенційні можливості їх застосування для фасадів будівель та споруд різного функціонально призначення.

Проведено аналіз типів фасадних систем, які доцільно обладнувати фасадними протипожежними перешкодами з врахуванням їх об'ємно-конструктивних параметрів та існуючих типів

протипожежних карнизів. Наведено переваги пасивних та активних фасадних протипожежних перешкод та відзначено можливі напрями підвищення ефективності їх застосування під час будівництва.

Відзначено перспективні шляхи удосконалення протипожежних карнизів, а саме наведено гіпотезу, що протипожежні карнизи можуть не лише обмежувати пожежу та її небезпечні чинники, але і відводити їх від площини фасаду будівлі у простір, тим самим знижуючи потенційно небезпечний вплив зовнішньої пожежі. Виявлено, що на сьогодні не встановлено закономірностей, які характеризують вплив ширини протипожежного карниза на явище виникнення зони повторного приєднання теплового потоку до фасаду будівлі, що потенційно обумовлює додаткову небезпеку для верхніх поверхів будівлі.

Запропоновано розглянути можливість досягнення підвищення ефекту обмеження поширення пожежі по зовнішніх огорожувальних конструкціях шляхом застосування більш досконалих протипожежних карнизів з обтічною формою для відведення теплового потоку та небезпечних чинників пожежі від зони фасаду. Відзначено перелік критеріїв, які можна застосовувати під час оцінювання ефективності різних типів протипожежних карнизів під час реалізації параметричного методу нормування у будівництві.

Здійснений аналіз може стати передумовою для удосконалення підходів під час забезпечення об'ємно-планувальних рішень щодо ефективного обмеження поширення пожежі по зовнішніх огорожувальних конструкціях будівель.

Список літератури

1. Балло Я. В. Створення експериментального випробувального стенду в рамках досліджень обмеження поширення пожежі по фасадам будівель. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. 2022. № 2 (13). С. 21–34.

2. Oleszkiewicz, I. (1989). Heat transfer from a window fire plume to a building facade. National Research Council Canada, Institute for Research in Construction. Pp. 163-170.

3. Балло Я. В., Сізіков О. О., Ніжник В. В., Жихарев О. П. Критерії оцінювання впливу висхідного теплового потоку на поширення пожежі по фасадним системам. Проблеми надзвичайних ситуацій: матеріали міжнародної науково-практичної конференції, м. Харків, 19 трав. 2022 р. Харків, 2022. С. 6–8.

4. Балло Я. В., Яковчук Р. С., Ніжник В. В., Кагітін О.І. Аналіз та систематизація типів фасадних систем будівель як передумова удосконалення протипожежних заходів. Пожежна безпека. ЛДУБЖД. №40, 2022, С. 5-15.

5. Giraldo Giraldo, B., Avellaneda Diaz-Grande, J., Lacasta Palacio, A. M., & Rodríguez, V. (2012). Computer-simulation research on building-facade geometry for fire spread control in buildings with wood claddings. In *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering 2012* (pp. 1-8).

6. Висотні будівлі. Основні положення. ДБН В.2.2-41:2019. – [Чинний від 2020-01-01]. – К.: Мінрегіон України від 26.03.2019 № 86. – 2019. – 53 с. – (Державні будівельні норми України).

7. ДСТУ 9192:2022. Пожежна безпека. Проектування висотних громадських будівель з умовною висотою від 100 м до 150 м. [Чинний від 2023-05-01]. Вид. офіц. Київ : ДП УкрНДНЦ, 2023. 39 с.

8. Boverket, Boverkets byggregler (Swedish building regulations), BBR 22, Karlskrona: Boverket, 2015; Morgado, H.J.L., Rodrigues, J.P.C., & Laim, L.M.S., Experimental and numerical study of balcony effect in external fire spread into upper floors, *Journal of Application of Structural Fire Engineering*, Czech Republic, 19-20 April 2013.

9. Luo, M., Zhao, L., Cheng, V., & Yau, R. (2001). Performance-based fire engineering design: Application of a CFD model for the prevention of external fire spread. *Preliminary Proceedings, 5th AOSFST*, Newcastle, Australia. pp 429-439.

10. Law, M. (1978). Fire safety of external building elements–The design approach. *Engineering Journal*, 15(2), 59.

11. ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2010 Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-2. Загальні дії. Дії на конструкції під час пожежі (EN 1991-1-2:2002, IDT); чинний від 2014-07-01. Вид. офіц. Київ : ДП УкрНДНЦ, 2014. 18 с.

12. Nilsson, M., Mossberg, A., Husted, B., & Anderson, J. (2016). Protection against external fire spread-Horizontal projections or spandrels. In *14th International Fire Science & Engineering Conference*, Royal Holloway College, University of London, UK (Vol. 2, pp. 1163-1174).

13. Rukavina, M. J., Carevic, M., & Pecur, I. B. (2017). Fire protection of facades. *The Guidelines for Designers, Architects, Engineers and Fire Experts*, pp.12-15.

14. Schleicher, A. (2016). Fire protection concepts for Timber-Glass Composite façades. In *MATEC web of conferences* (Vol. 46, p. 05003). EDP Sciences. P. 10.

15. Kolaitis, D. I., Kontis, C., & Tsiachlas, C. (2021). Effect of horizontal projection's vertical location on the characteristics of externally venting flames. *Fire safety journal*, 120, 103138.

16. Nilsson, M., Mossberg, A., Husted, B., & Anderson, J. (2016). Protection against external fire spread-Horizontal projections or spandrels. In *14th International Fire Science & Engineering Conference*,

Royal Holloway College, University of London, UK (Vol. 2, pp. 1163-1174).

17. Nilsson, M. (2016). The impact of horizontal projections on external fire spread-a numerical comparative study, Report nr. 5510, Lund University, Division of Fire Safety Engineering, Lund, 2016. P. 147.

18. ДБН В.2.6-33:2018 «Конструкції зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією. Вимоги до проектування». [Чинний від 2018-12.01]. Київ, 2018. 21 с.

19. ДБН В.2.2-41:2019. Висотні будівлі. Основні положення. – Київ : Мінрегіон України, 2018. – 53

20. Velasco, R., Brakke, A. P., & Chavarro, D. (2015). Dynamic façades and computation: Towards an inclusive categorization of high performance kinetic façade systems. In *Computer-Aided Architectural Design Futures. The Next City-New Technologies and the Future of the Built Environment: 16th International Conference, CAAD Futures 2015, São Paulo, Brazil, July 8-10, 2015. Selected Papers 16* (pp. 172-191). Springer Berlin Heidelberg.

21. Лапенко, О. І., & Махінько, Н. О. (2015). Методи комп'ютерного моделювання в задачах аеродинаміки висотних споруд. *Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура*, (123), 49-57.

22. SP Fire 105 External wall assemblies and facade claddings. Reaction to fire. - SP Technical Research Institute of Sweden, 1994. 16 p.

References

1. Ballo, Ya. (2022). Creation of an experimental test bench within the framework of research on limiting the spread of fire on building facades. *Scientific bulletin: Civil protection and fire safety*, (2 (14)), 21-34. [in Ukrainian].

2. Oleszkiewicz, I. (1989). Heat transfer from a window fire plume to a building facade (pp. 163-170). National Research Council Canada, Institute for Research in Construction. [in English].

3. Ballo, Ya.V., Sizikov, O.O., Nizhnyk, V.V., Zhykhariev, O.P. (2022). Kryterii otsiniuvannya vplyvu vyskhidnoho teplovoho potoku na poshyrennia pozhezhi po fasadnym systemam [Criteria for evaluating the influence of upward heat flow on the spread of fire along facade systems]. *Materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii. Kharkiv: Natsionalnyi universytet tsyvilnoho zakhystu Ukrainy* s. 6-7. [in Ukrainian].

4. Ballo, Ya.V., Yakovchuk, R.S., Nizhnyk, V.V., Kahitin, O.I. (2022). Analiz ta systematyzatsiia typiv fasadnykh system budivel yak peredumova udoskonalennia protypozhezhnykh zakhodiv [Analysis and systematization of types of facade systems of buildings as a prerequisite for improving fire prevention measures]. *Visnyk «Pozhezhna bezpeka» LDUBZhD*, 40, s. 5-15. [in Ukrainian].

5. Giraldo Giraldo, B., Avellaneda Diaz-Grande, J., Lacasta Palacio, A. M., & Rodríguez, V. (2012). Computer-simulation research on building-facade geometry for fire spread control in buildings with wood claddings. In *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering 2012* (pp. 1-8). [in English].

6. High-rise buildings. Substantive provisions. DBN V.2.2-41:2019. – [Effective from 2020-01-01]. - K.: Ministry of the Regions of Ukraine dated March 26, 2019 No. 86. - 2019. - 53 p. - (State building regulations of Ukraine) [in Ukrainian].

7. DSTU 9192:2022. Fire Security. Designing high-rise public buildings with a nominal height of 100 m to 150 m [Effective from 2023-05-01]. Kind. officer Kyiv: SE UkrNDNC, 2023. 39 p. [in Ukrainian].

8. Nilsson, M., Mossberg, A., Husted, B., & Anderson, J. (2016). Protection against external fire spread-Horizontal projections or spandrels. In *14th International Fire Science & Engineering Conference, Royal Holloway College, University of London, UK* (Vol. 2, pp. 1163-1174). [in English].

9. Luo, M., Zhao, L., Cheng, V., & Yau, R. (2001). Performance-based fire engineering design: Application of a CFD model for the prevention of external fire spread. *Preliminary Proceedings, 5th AOSFST, Newcastle, Australia*. pp 429-439. [in English].

10. Law, M. (1978). Fire safety of external building elements–The design approach. *Engineering Journal*, 15(2), 59. [in English].

11. DSTU-NB EN 1991-1-2:2010 Eurocode 1. Actions on structures. Part 1-2. General actions. Actions on structures during fire (EN 1991-1-2:2002, IDT); valid from 2014-07-01. Kind. officer Kyiv: SE UkrNDNC, 2014. 18 p. [in Ukrainian].

12. Nilsson, M., Mossberg, A., Husted, B., & Anderson, J. (2016). Protection against external fire spread-Horizontal projections or spandrels. In *14th International Fire Science & Engineering Conference, Royal Holloway College, University of London, UK* (Vol. 2, pp. 1163-1174). [in English].

13. Rukavina, M. J., Carevic, M., & Pecur, I. B. (2017). Fire protection of facades. *The Guidelines for Designers, Architects, Engineers and Fire Experts*, pp.12-15. [in English].

14. Schleicher, A. (2016). Fire protection concepts for Timber-Glass Composite façades. In *MATEC web of conferences* (Vol. 46, p. 05003). EDP Sciences. P. 10. [in English].

15. Kolaitis, D. I., Kontis, C., & Tsihclas, C. (2021). Effect of horizontal projection's vertical location on the characteristics of externally venting flames. *Fire safety journal*, 120, 103138. [in English].

16. Nilsson, M., Mossberg, A., Husted, B., & Anderson, J. (2016). Protection against external fire spread-Horizontal projections or spandrels. In *14th International Fire Science & Engineering*

Conference, Royal Holloway College, University of London, UK (Vol. 2, pp. 1163-1174). [in English].

17. Nilsson, M. (2016). The impact of horizontal projections on external fire spread-a numerical comparative study, Report nr. 5510, Lund University, Division of Fire Safety Engineering, Lund, 2016. P. 147. [in English].

18. DBN V.2.6-33:2018 "Constructions of external walls with facade thermal insulation. Design requirements". [Effective from 2018-12.01]. Kyiv, 2018. 21 p. [in Ukrainian].

19. DBN V.2.2-41:2019. High-rise buildings. Substantive provisions. – Kyiv: Ministry of Regions of Ukraine, 2018. – 53 21 p. [in Ukrainian].

20. Velasco, R., Brakke, A. P., & Chavarro, D. (2015). Dynamic façades and computation: Towards

an inclusive categorization of high performance kinetic façade systems. In Computer-Aided Architectural Design Futures. The Next City-New Technologies and the Future of the Built Environment: 16th International Conference, CAAD Futures 2015, São Paulo, Brazil, July 8-10, 2015. Selected Papers 16 (pp. 172-191). Springer Berlin Heidelberg. [in English].

21. Lapenko, O. I., & Makhinko, N. O. (2015). Computer modeling methods in problems of aerodynamics of high-rise buildings. Communal management of cities. Series: Technical Sciences and Architecture, (123), 49-57. [in Ukrainian].

22. External wall assemblies and facade claddings. Reaction to fire (1994). SP Fire 105. SP Technical Research Institute of Sweden, 16 s. [in English].

© Б. М. Ковалишин, Я. В. Балло, В. В. Ніжник,
І. Г. Стилик, О. І. Кагітін, 2024.

Оглядова стаття.

Надійшла до редакції 07.05.2024.

Прийнято до публікації 12.06.2024.



В. В. Ковалишин, В. М. Марич, Р. Б. Веселівський,

Вол. В. Ковалишин, Р. Я. Лозинський

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5463-0230> – В. В. Ковалишин

<http://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/0009-0004-7292-711X> – Р. Я. Лозинський



kovalyshyn.v@gmail.com

ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ГАСІННЯ КОМБІНОВАНИХ ПОЖЕЖ ЗА НАЯВНОСТІ ЛЕГКИХ МЕТАЛІВ ЧИ ФОСФОРНИХ СПОЛУК

Постановка проблеми. Під час збройної агресії росії на території України неодноразово були зафіксовані випадки виникнення комбінованих пожеж за наявності легких металів чи фосфорних сполук, котрі супроводжуються високою температурою горіння та виділенням токсичних продуктів горіння. Враховуючи небезпеку цих пожеж, важливим є їх швидка локалізація та ліквідація. Проаналізувавши наукові праці щодо ефективних вогнегасних засобів та способів їх подавання, ми дійшли висновку, що відсутній єдиний підхід та алгоритм гасіння зазначених пожеж. Отже, обґрунтування технології гасіння комбінованих пожеж за наявності легких металів чи сполук фосфору та дослідження впливу товщини шару вогнегасного порошку на температуру горіння та охолодження магнію є актуальним науково-технічним завданням.

Мета роботи – вдосконалення технології гасіння комбінованих пожеж за наявності легких металів чи сполук фосфору та дослідження впливу товщини шару вогнегасного порошку на температуру горіння та охолодження магнію.

Методи дослідження. Для проведення дослідження використано комплексний метод, який включає в себе: аналіз та застосування статистичних методів обробки даних та комплексний метод дослідження пожеж. Для дослідження ефективності охолодження під час процесу гасіння ошук сплав магнію використано методику визначення необхідної кількості вогнегасного порошку для досягнення ізолювального ефекту.

Основні результати дослідження. Для ефективного гасіння пожеж класу D необхідно вивчити теплофізичні характеристики вогнегасних порошків в умовах гасіння ними пожеж магнієвих сплавів. Експериментально досліджено здатність до теплової ізоляції вогнегасного порошку на основі хлориду натрію, меленого шлаку, амофосу, аеросилу та стеарату цинку. Встановлено, що товщина шару вогнегасного порошку впливає на температуру горіння та охолодження магнію. Визначено залежність температури на межі метал/порошок та температури на межі повітря/порошок від товщини шару нанесеного вогнегасного порошку. На основі отриманих експериментальних значень температур, визначено коефіцієнт теплопровідності та теплоємності вогнегасного порошку та розраховано необхідну товщину шару порошку для забезпечення теплової ізоляції осередку горіння ошук сплаву магнію. Необхідна товщина шару вогнегасного порошку, яка забезпечить безпечну для людини температуру на границі з повітрям 80 °C, становить 24 мм.

Для ефективного гасіння комбінованих пожеж на початковій стадії розвитку необхідно використовувати установку порошково-пінного гасіння з насадкою-заспокоювачем.

Висновки. Експериментально досліджено вплив товщини шару вогнегасного порошку на температуру горіння та охолодження магнію. Визначено необхідну товщину шару вогнегасного порошку на основі хлориду натрію, меленого шлаку, амофосу, аеросилу та стеарату цинку ($\delta = 24$) мм для досягнення безпечної для людини температури на границі з повітрям (80 °C).

Розроблено рекомендації з гасіння легких металів чи фосфорних сполук та сформульовано основні вимоги безпеки праці під час роботи з вогнегасними порошками та пінами/піною підвищеної стійкості.

Ключові слова: легкі метали, фосфорні сполуки, сплав магнію, технологія гасіння, ефективність гасіння, безпека праці, вогнегасні речовини.

SUBSTANTIATION OF TECHNOLOGY FOR EXTINGUISHING COMBINED FIRES IN THE PRESENCE OF LIGHT METALS OR PHOSPHORUS COMPOUNDS

Formulation of the problem. During Russia's armed aggression on the territory of Ukraine, cases of combined fires in the presence of light metals or phosphorus compounds, accompanied by high combustion temperatures and the release of toxic combustion products, have been repeatedly recorded. Given the danger of these fires, it is important to quickly localise and eliminate them. The analysis of scientific papers on effective extinguishing agents and methods of their supply has revealed the absence of a single approach and algorithm for extinguishing these fires. Accordingly, the substantiation of the technology for extinguishing combined fires in the presence of light metals or phosphorus compounds and the study of the effect of the thickness of the extinguishing powder layer on the combustion and cooling temperature of magnesium is an urgent scientific and technical task.

The aim of the work is to improve the technology for extinguishing combined fires in the presence of light metals or phosphorus compounds and to study the effect of the thickness of the extinguishing powder layer on the combustion and cooling temperature of magnesium.

Research methods. A comprehensive method was used to conduct the study, which includes: the analysis and application of statistical data processing methods and a comprehensive method of fire research. To study the effectiveness of cooling during the process of extinguishing magnesium alloy cinders, a methodology was used to determine the required amount of fire extinguishing powder to achieve an insulating effect.

The main results of the study. For effective extinguishing of class D fires, it is necessary to study the thermal characteristics of fire extinguishing powders in the conditions of extinguishing magnesium alloy fires. The thermal insulation ability of fire extinguishing powders based on sodium chloride, ground slag, ammophos, aerosil, and zinc stearate was experimentally investigated. The effect of the thickness of the fire extinguishing powder layer on the combustion and cooling temperature of magnesium was determined. The dependence of the temperature at the metal/powder interface and the temperature at the air/powder interface on the thickness of the layer applied by the fire extinguishing powder was determined. Based on the experimental temperature values obtained, the coefficient of thermal conductivity and heat capacity of the fire extinguishing powder was determined and the required thickness of the powder layer was calculated to ensure thermal insulation of the burning centre of magnesium alloy shavings. The required thickness of the fire extinguishing powder layer, which will ensure a safe temperature for humans at the border with an air of 80 °C, is 24 mm.

For effective extinguishing of combined fires at the initial stage of development, it is necessary to use a powder-foam extinguishing unit with a nozzle-soothing agent.

Conclusions. The influence of the thickness of the extinguishing powder layer on the temperature of magnesium combustion and cooling was experimentally investigated. The required thickness of the layer of extinguishing powder based on sodium chloride, ground slag, ammophos, aerosil, and zinc stearate ($\delta = 24$ mm) to achieve a safe temperature for humans at the border with an air of (80 °C) was determined.

Recommendations for extinguishing light metals or phosphorus compounds have been developed and the basic requirements for occupational safety when working with extinguishing powders and foams/extended life foams have been formulated.

Keywords: light metals, phosphorus compounds, magnesium alloy, extinguishing efficiency, occupational safety, fire extinguishing agents.

Постановка проблеми. Гасіння комбінованих пожеж за наявності легких металів чи фосфорних сполук є проблемою та викликом для рятувальників. Ця проблема зросла під час збройної агресії росії на території України. Використання запалювальної зброї, обмежено. Протокол III-ї Конвенції про конкретні види звичайної зброї забороняє використання будь-яких запалювальних пристроїв проти цивільного населення або майна. Заборонено застосування зброї в районах, де відбувається концентрація цивільного населення, або де немає чіткого поділу між військовими і цивільними цілями. Необхідно передбачати заходи щодо обмеження негативно дії запалювальної зброї та зведення до мінімуму випадкових жертв та травм

серед цивільного населення, передбачати заходи щодо збереження майна.

Також жовтий фосфор широко застосовується у виробництві боєприпасів для військових цілей. Дуже часто під час війни ворог використовує фосфорні запалювальні боєприпаси. Тому виникає необхідність у застосуванні ефективних рекомендацій з гасіння таких пожеж.

Для розуміння небезпеки проаналізуємо основні властивості фосфору та магнію [1]. Фосфор – це легкозаймиста воскоподібна речовина від безбарвного до жовтуватого кольору. Він прозорий і має різкий запах, що нагадує запах часнику. Можливе спалахування від контакту з киснем. Фосфор є самозапальним матеріалом, тому

його зберігають під водою, у герметичних контейнерах і при мінімальному освітленні. Потрапляючи на шкіру людини фосфор викликає опіки, а потрапляючи в середину організму, він спричиняє важке отруєння і смерть. Смертельна доза становить 0,05-0,15 г. Фосфор використовується при виробництві мінеральних добрив і в так званих фосфорних бомбах. Характеризується здатністю прилипати навіть до вертикальних поверхонь і обпалювати їх.

Магній – це сріблясто-білий, блискучий метал, відносно м'який і пластичний, добре проводить тепло та електрику. Він майже в п'ять разів легший за мідь, у 4,5 раза – за чорний метал, і навіть від алюмінію в 1,5 раза легший. Магній плавиться при 651°C, але за звичайних умов його важко розплавити, він запалюється при 550°C і миттєво згорає з виділенням великої кількості тепла і світла. Гасіння палаючого магнію водою неприпустиме: може утворитися гримуча суміш водню з киснем, яка вибухає. Вуглекислий газ також не здатний загасити палаючий магній, тому, що магній відновлює його.

Проведемо аналіз пожеж, спричинених магнієвими і фосфорними сполуками, в Україні та світі.

Пожежа з горінням магнію в м. Зонненберзі, Німеччина, у 2010 році завдала збитків на мільйони євро. Вогонь охопив 30 тонн магнію. Гасіння пожежі було повільним через відсутність ефективних первинних засобів пожежогасіння [2].

2 жовтня 2015 року понад 20 пожежників гасили 47 тонн магнію, що горіли на заводі PolMag у Польщі. Початкові спроби загасити розплавлений магній були неефективними. Були використані порошкові вогнегасники, але вогонь був занадто сильним, щоб його загасити, при цьому вогнегасних речовин було недостатньо [3].

30 березня 1988 року в м. Чикаго вибухнув трейлер з магнієм і 200 людей довелося евакуювати з прилеглих територій. Трейлер був на 91% заповнений чистим магнієм. Температура горіння досягла 2030 °C, повністю розплавивши трейлер з алюмінію і сталі. Пожежники, які прибули на місце події, не змогли загасити вогонь, оскільки не мали спеціальних вогнегасних порошоків, і чекали, поки згорить весь магній. Щоб запобігти поширенню вогню на будівлі та споруди, розташовані навколо місця пожежі, рятувальники охолоджували їх [4].

10 червня 2018 року виникла пожежа на автомобільному заводі Корпорації BMW. За повідомленнями, горіли вироби, що містять магній. Дим був настільки сильним, що мешканцям рекомендували зачинити вікна та двері. Пожежа також вплинула на залізничний рух [5].

2 вересня 2017 року десятки тисяч людей, що мешкають в автономному співтоваристві Мадрид, Іспанія, були попереджені про необхідність залишатися в приміщенні через токсичний дим. Причиною пожежі стало загоряння 40 тонн магнію та алюмінію на виробничому складі муніципалітету Фуенлабрада [6].

У квітні 2010 року на ВО "Київприлад" па вулиці Гарматній, 2 у Солом'янському районі Києва стався потужний вибух магнію. Вибух стався, коли іскри від газозварювального апарата потрапили на контейнер з магнієм, в результаті чого двоє людей загинули на місці. Висока температура розплавилася металеву конструкцію ліфта, а ударна хвиля вибила вікна магазинів з першого по четвертий поверх [7].

16 липня 2007 року близько 17 години селі Ожидів, Буського району Львівської області на залізничному перегоні Красне-Ожидів зійшов з рейок та перекинувся потяг з 15 цистернами (рис. 1), у яких перевозили жовтий фосфор із Казахстану до Польщі.



Рисунок 1 – Гасіння жовтого фосфору на залізничній станції Ожидів Львівської області (2007 рік)

Через витік фосфору з однієї цистерни відбулося самозаймання шести сусідніх. Пожежу загасили, але утворилася хмара продуктів згоряння (зона ураження: близько 90 км). Зоною ураження охоплено 14 населених пунктів у Буському районі та окремих територіях Радехівського та Бродівського районів. Внаслідок пожежі отруїлося 16 осіб [8].

Масштабні пожежі, що супроводжувалися вибухами на складах боєприпасів, які містять магнієві сплави, підтверджують актуальність проблеми: Артемівськ, Донецька область (2003); Новоіванівка, Запорізька область (2004, 2005, 2006, 2007); Лозова, Харківська область (2008); Сватове, Луганська область (2015); вибухи на території складів у Запорізькій області (2016); Балаклія Харківська область та Калинівка Вінницька область (2017) [9].

З початку повномасштабної війни в Україні, росія активно використовує фосфорні бомби. Таке застосування зафіксовано в Рубіжному (Луганської області), Маріуполі, Мар'їнці, Авдіївці Сєверодонецьку, Краматорську і Попасній (Донецької області) [10].

Актуальність досліджень гасіння комбінованих пожеж за наявності сплавів магнію та фосфорних сполук підтверджується кількістю пожеж в Україні та світі.

Аналіз досліджень та публікацій. Станом на сьогоднішній час в Україні немає розроблених рекомендацій для гасіння легких металів чи фосфорних сполук, а тільки вогнегасні речовини та засоби їх подачі для гасіння пожеж класу D, A, B. Такими проблемними питаннями займалися А. Антонов, В. Ковалишин, М. Вайсман, О. Демиденко, М. Білошицький, R. Nelson, Kang et al H., C. Wilson, R. Tapscott, D. Zallen, B. Марич [1].

У статті [11] проаналізовано сучасний стан проблем розробки та застосування порошків для гасіння пожеж класу D та сполук фосфору і запропоновано створення нових рецептур таких порошків з використанням вітчизняної сировини та удосконалення технічних засобів їх подачі як шлях до підвищення ефективності порошкового пожежогасіння в Україні.

У статті [12] на основі аналізу публікацій та літературних джерел показано, що наразі відсутні вогнегасні речовини, спрямовані на покращення гасіння комбінованих пожеж класів A, B і D. На основі експериментальних досліджень окремих компонентів порошкових вогнегасних речовин для гасіння пожеж класу D також встановлено, що оптимальним співвідношенням складу порошкових вогнегасних речовин, що забезпечує оптимальні значення інтенсивності, є: 17,5% амофосу, 60% NaCl, 20% меленого шлаку та 2,5% аеросилу/стеарату цинку.

У роботі [13] запропоновано рецептуру універсального порошку КМ-2 для гасіння пожеж класу D, A, B, який складається з хлориду натрію, амофосу, шлаку, аеросилу, а також розроблена технологія комбінованого гасіння пожеж класу D і A.

Автори пропонують гасити комбіновані пожежі класів A, B, C та E з використанням аерозолів та газів-флегматизаторів [14]. Така вогнегасна речовина не є ефективною для гасіння комбінованих з класом D, що відображено в роботі.

У роботі [15] проведено аналіз українських та міжнародних нормативних документів, які регламентують методи випробувань з визначення вогнегасної здатності вогнегасних порошків, призначених для гасіння пожеж за класом D. Встановлено, що необхідно розробити відповідний національний стандарт для випробування вогнегасних порошків спеціального призначення.

Звичайні протипожежні засоби, такі як вода та водні розчини, не можна використовувати для гасіння сполук фосфору, оскільки вони малоефективні. Фосфор має тенденцію до швидкого повторного спалахування кожного разу, коли він отримує доступ до повітря, наприклад, після випаровування чи стікання води, яка була використана для гасіння. Також вода буде підсилювати горіння магнію та його сплавів. Досвід гасіння жовтого фосфору в Ожидові показав, що фосфор найкраще гасити піною низької та середньої кратності та використовувати стволи СВП та ГПС. Шар піни наносять до досягнення надійного захисту фосфору від самозагорання. Ще краще було б подати компресійну піну, піну підвищеної стійкості. Можна використати при невеликих площах горіння фосфору пінні пересувні, стаціонарні установки пожежогасіння.

За відсутності вогнегасної піни потрібно ізолювати фосфор від повітря порошками та піскосумішами до прибуття пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС.

Для гасіння легких металів слід використовувати відповідні вогнегасні речовини та засоби їх подачі. При гасінні легких металів порошок слід наносити на горючу поверхню з такою інтенсивністю, щоб покрити поверхню і запобігти поширенню вогню. Багато вчених вивчали вогнегасні речовини для гасіння пожеж класу D. У всіх випадках дослідники дійшли висновку, що спеціальні порошки повинні містити NaCl і KCl. Наповнювачами можуть бути: пісок, шлак, зола, мелаїнові сполуки, графіт і каолінова глина.

Для гасіння магнію та його сполук використовується вогнегасний порошок спеціального призначення для гасіння пожеж класу D. Вогнегасні порошки цього типу виготовляють на

основі NaCl або KCl. В Україні розроблені порошки КМ-1, КМ-2, КМ-3. Цими порошками можуть споряджатися посудини від 10 до 250 кг, які використовуються для порошкових вогнегасників, цистерни порошкових автомобілів. Розроблений вогнегасний порошок КМ-3 призначений для гасіння комбінованих пожеж за наявності сполук фосфору, пожеж класу D (магнію та його сплавів) та легкозаймистих рідин.

Вогнегасний порошок придатний до використання у вогнегасниках, установках пожежогасіння і пожежних автомобілях порошкового та комбінованого пожежогасіння в усіх кліматичних зонах при температурі від мінус 50 °С до 50 °С.

За результатами аналізу вогнегасних речовин та засобів їх подачі для гасіння пожеж класу А, В, D та фосфорних сполук встановлено необхідність розроблення технології гасіння комбінованих пожеж за наявності легких металів чи сполук фосфору.

Мета – вдосконалення технології гасіння комбінованих пожеж за наявності легких металів чи сполук фосфору та дослідження впливу товщини шару вогнегасного порошку на температуру горіння та охолодження магнію.

Методи досліджень. Для проведення дослідження використано комплексний метод, який

включає в себе: аналіз та застосування статистичних методів обробки даних та комплексний метод дослідження пожеж. Для дослідження ефективності охолодження під час процесу гасіння ошук сплав магнію використано методику визначення необхідної кількості вогнегасного порошку для досягнення ізолювального ефекту.

Основний матеріал. Існуючі вогнегасні речовини та способи їх подачі потребують чіткого алгоритму застосування для ефективного гасіння комбінованих пожеж за наявності легких металів чи сполук фосфору. Це зумовлено небезпекою горіння легких металів та фосфорних сполук, що супроводжується високою температурою горіння та виділенням токсичних продуктів горіння.

Для ефективного гасіння пожеж класу D необхідно вивчити теплофізичні характеристики вогнегасних порошків в умовах гасіння ними пожеж магнієвих сплавів. Для цього використовуємо методику, яка представлена у роботі [1].

При прогнозуванні теплової ізоляції осередку горіння ошук сплавів магнію проведено експериментальні дослідження з вогнегасним порошком [12].

Дослідження здатності до теплової ізоляції розробленого складу вогнегасного порошку проведено з використанням лабораторної установки, схема якої представлена на рисунку 2.

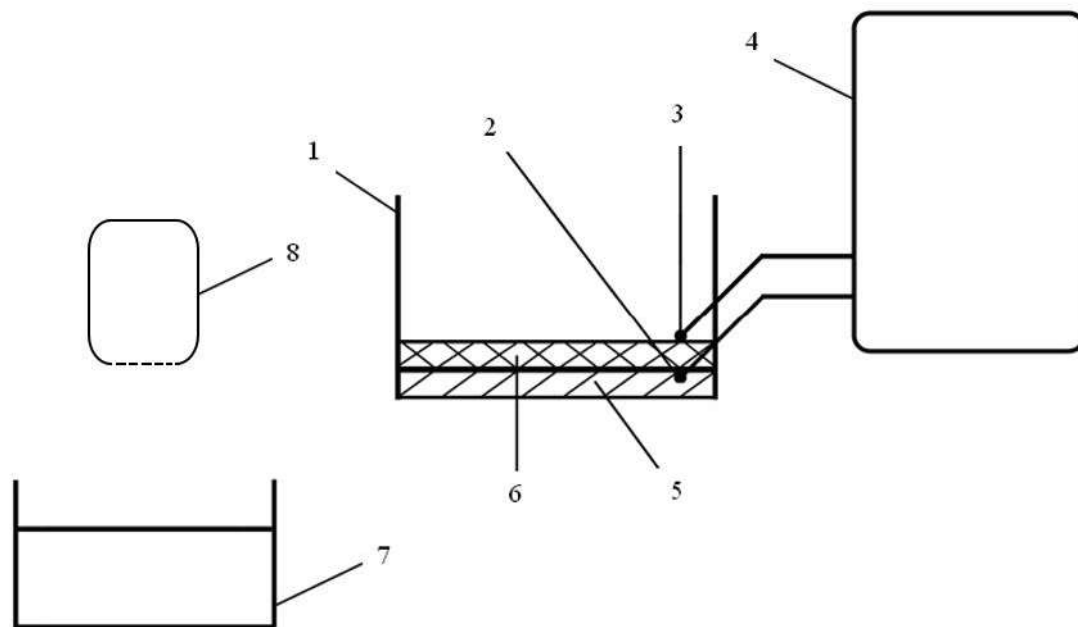


Рисунок 2 – Схема лабораторної установки для визначення ефективності гасіння легких металів:
1 – деко термостійке розміром 15х19 см; 2 – термопара для визначення температури на поверхні металу, що горить; 3 – термопара на поверхні порошку на межі з повітрям; 4 – комп'ютер; 5 – ошурки сплаву магнію та алюмінію; 6 – вогнегасний порошок; 7 – посудина з вогнегасним порошком;
8 – посудина для нанесення порошку на горючу поверхню

При проведенні експериментальних досліджень визначимо вплив товщини шару вогнегасного порошку на температуру горіння та охолодження

магнію. Для досліджень використаємо склад порошку на основі хлориду натрію, меленого шлаку, амофосу, аеросилу та стеарату цинку [12].

Інтенсивність подавання порошку за якої температура T_3 на межі повітря-порошок, буде меншою за $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, становить від $0,372$ до $0,93\text{ кг/м}^2\cdot\text{с}$.



а)

На рисунку 3 показано процес насипання порошку для гасіння сплаву магнію.



б)

Рисунок 3 – Насипання порошку для гасіння сплаву магнію в лабораторних умовах

На рисунку 4 показано процес і вимірювання температури на поверхні під час гасіння сплаву

магнію. рис. 3.



а)



б)

Рисунок 4 – Процес гасіння сплаву магнію і вимірювання температури на поверхні шару вогнегасного порошку та на межі шару вогнегасного порошку та сплаву магнію

Результати експериментальних досліджень впливу товщини шару вогнегасного порошку на температуру горіння та охолодження магнію представлено на рисунках 5 – 7.

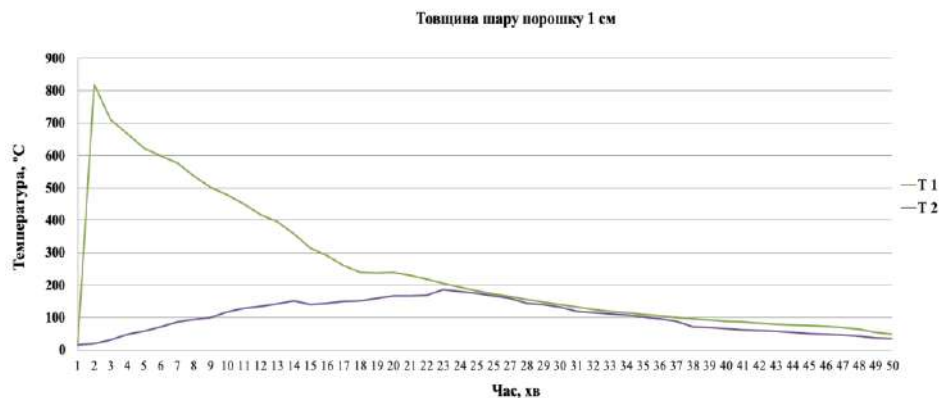


Рисунок 5 – Температурні показники на поверхні шару (1 см) вогнегасного порошку та на стику шару вогнегасного порошку та сплаву магнію під час процесу гасіння ошукрок сплаву магнію в лабораторних умовах: Т 1 – термопара на поверхні металу, що горить; Т 2 – термопара на поверхні порошку на межі з повітрям

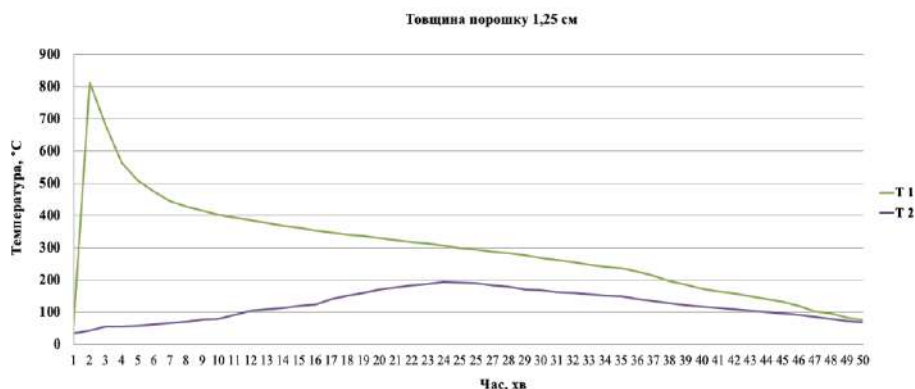


Рисунок 6 – Температурні показники на поверхні шару (1,25 см) вогнегасного порошку та на стику шару вогнегасного порошку та сплаву магнію під час процесу гасіння ошукрок сплаву магнію в лабораторних умовах: Т 1 – термопара на поверхні металу, що горить; Т 2 – термопара на поверхні порошку на межі з повітрям

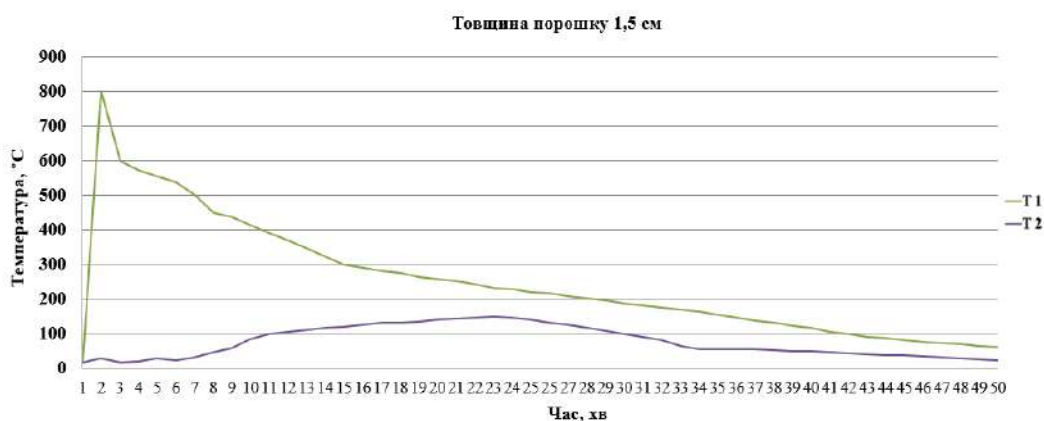


Рисунок 7 – Температурні показники на поверхні шару (1,5 см) вогнегасного порошку та на стику шару вогнегасного порошку та сплаву магнію під час процесу гасіння ошукрок сплаву магнію в лабораторних умовах: Т 1 – термопара на поверхні металу, що горить; Т 2 – термопара на поверхні порошку на межі з повітрям

У таблиці 1 наведено температурні показники з магнієвих сплавів. шару вогнегасного порошку під час гасіння стружки

Таблиця 1

Температурні показники шару вогнегасного порошку під час гасіння ошукрок з магнієвих сплавів

№ з/п	Товщина шару нанесеного вогнегасним порошком, мм	Температура на межі метал / порошок, °C	Температура (Тз) на межі повітря / порошок, °C	Час гасіння, с	Розмір дека, мм	Маса витраченого порошку, г
1	10	820	187	24	150×190	256
2	12,5	812	193	21		320
3	15	803	150	20		384

Для розробки математичної моделі цього теплового процесу було враховано такі положення:

1. Теплові процеси в шарі вогнегасного порошку при гасінні магнію є нестационарними, за винятком першого експериментального процесу, і це припущення може бути виконане, якщо створити відповідні експериментальні умови.

2. Умови теплопередачі на межі між вогнегасним порошком і повітрям однакові у всіх експериментах і не змінюються.

3. Температура шару порошку на межі з горючим середовищем постійна і не змінюється протягом часу гасіння.

4. Шар вогнегасного порошку є однорідним, ізотропним і безпустотним;

5. При визначенні ефективного коефіцієнта теплопровідності враховують супутні теплові процеси в шарі вогнезахисного порошку.

6. Коефіцієнт ефективної теплопровідності $\lambda(\delta)$ не залежить від температури. Його значення може залежати від товщини шару вогнегасної речовини (δ).

7. Питома теплоємність C_p і густина ρ порошку є постійними величинами і не залежать від температури або товщини шару [16,17].

Використовуючи методику, викладену в [18], проведемо розрахунок необхідної товщини шару вогнегасного порошку для забезпечення теплової ізоляції осередку горіння ошурок сплаву магнію.

Для визначення температури на границі між шаром вогнегасного порошку та повітрям, з якої надалі визначаємо коефіцієнт теплопровідності, коефіцієнт тепловіддачі та їх залежностей від товщини шару порошку, використовуємо рівняння:

$$\theta_{1,k} = \frac{2\lambda(\delta)\theta_{m,k} + \alpha_l \delta \lambda(\delta) \theta_a}{2\lambda(\delta) + \alpha_l \delta \lambda(\delta)} \quad (1)$$

де: λ – коефіцієнт теплопровідності;
 δ – товщина порошку; α_l – коефіцієнт тепловіддачі;
 θ_a – температура горючого середовища.

З огляду на роботи [16,17] значення питомої теплоємності (C_p) та густини порошку (ρ) приймаємо 1000 Дж/(кг·°C) та 950 кг/м³ відповідно.

З міркувань безпеки для людини приймаємо необхідну температуру на границі з повітрям 80 °C. Час гасіння ошурок сплаву магнію в лабораторних умовах згідно з методикою становить 30 с, або до припинення горіння, при цьому температура на межі поверхні металу, що горить, та вогнегасним порошком становить 900 °C.

Провівши відповідні розрахунки, визначено, що необхідна товщина шару вогнегасного порошку, яка забезпечить температуру на границі з повітрям 80 °C, становить 24 мм.

Технологія гасіння комбінованих пожеж за наявності легких металів чи сполук фосфору. Для ефективного застосування існуючих вогнегасних речовин та способів їх подачі пропонується такий порядок гасіння. До об'єкта, де сталася пожежа, слід прибувати тільки з навітряної сторони по визначених під'їздах. Якщо доступ до об'єкта з навітряного боку неможливий, рятувальники, які прибувають на місце події, повинні використовувати ізолюючий захисний одяг та засоби захисту органів дихання.

Для ефективного гасіння комбінованих пожеж на початковій стадії розвитку пропонуємо використовувати установку порошково-пінного гасіння (УППГ). Принципова схема цієї установки з насадкою-заспокоювачем представлена на рисунку 8.

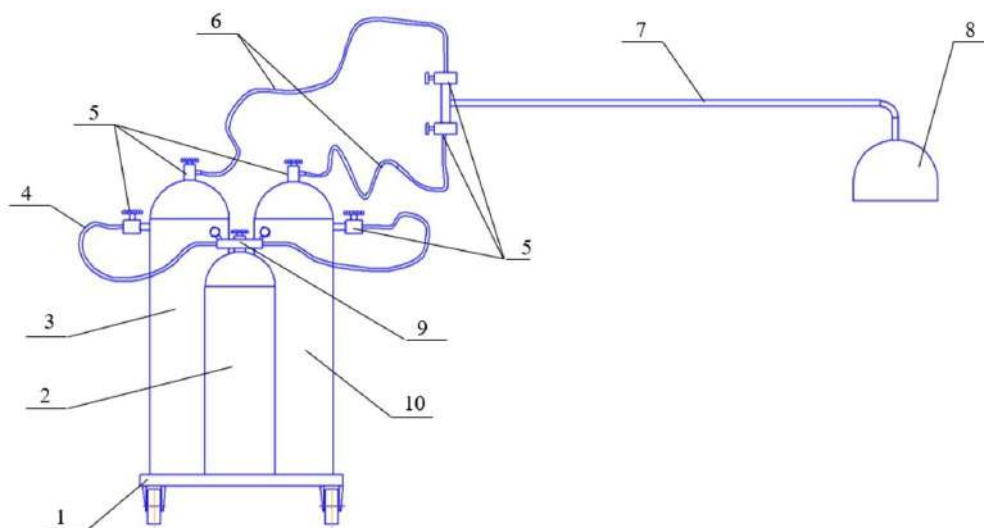


Рисунок 8 – Установка порошково-пінного гасіння (УППГ): 1 – шасі установки; 2 – балон зі стиснутим повітрям; 3 – посудина (12 л) з вогнегасним порошком КМ-З; 4 – шланг високого тиску для подачі стиснутого повітря; 5 – запірні шарові крани; 6 – шланги подачі вогнегасних речовин; 7 – шланг із заспокоювачем для транспортування вогнегасних речовин в осередок горіння; 8 – заспокоювач; 9 – редуктор для регулювання тиску повітря; 10 – посудина (12 л) з розчином піноутворювача

Установка складається із двох посудин та балона, заповненого стиснутим повітрям, які

встановлено на пересувному шасі. Посудина 1 – об'єм 12л, заповнена вогнегасним порошком

спеціального призначення (ВПСП) КМ-3. Посудина 2 – об'єм 12 л, (заповнена 6 % розчином піноутворювача спеціального призначення). Ця установка дає змогу швидко переходити від порошкового до пінного гасіння.

З установкою працюють дві людини. Гасіння пожеж із використанням установки УППГ проводиться таким чином. Розташовують установку на відстані 4-5 м від палаючого вогнища. Після чого один з операторів контролює процес подачі вогнегасних речовин з посудини установки, а другий через насадку-заспокоювач подає вогнегасні речовини. З метою досягнення повного гасіння, а також продувки системи, вогнегасні речовини слід подавати до повного вивільнення вогнегасних балонів установки комбінованого гасіння. На вогнище, де горить магній або його сплави, або будь які легкі метали, спочатку подають ВПСП до повного гасіння, за наявності залишків порошку накривають легкозаймисті та горючі речовини (ЛЗР та ГР) або дерев'яні вироби. Гасіння пожеж класу В, А далі проводять піною. Оператор переключає заспокоювач на балон з пінним розчином та подає піну. Піну подають на всю поверхню конструкцій навколо магнію. Піна поганої якості (з великим вмістом води) подається на дерев'яні конструкції або зливається набік. Для запобігання потраплянню води на ошурки магнію струмись «микрої піни» категорично заборонено подавати на поверхню порошку. Це може підсилити горіння.

При гасінні осередку пожежі із застосуванням насадок-заспокоювачів відстань від нижньої поверхні насадки до вогню повинна бути 15-30 см, при цьому треба насадку переміщувати в горизонтальній площині з метою рівномірного покриття горючої поверхні порошком.

При гасіння пожеж фосфору та легких металів категорично заборонено використовувати в якості вогнегасних речовин воду. При гасінні пожеж класу А, В, D великої площі та значним фронтом горіння, рекомендовано застосовувати декілька установок УППГ.

Якщо є можливість накрити всю площу горіння (наприклад запалювальна граната), то корпусом заспокоювача накривають предмет гасіння, запобігаючи розбризкуванню горючих крапель.

При горінні ЛЗР у деках, доцільніше з установки комбінованого гасіння одразу подавати піну через насадку-заспокоювач. Якщо горіння ЛЗР відбувається на землі, то можна також використати вогнегасний порошок, що подається через насадку-заспокоювач.

Під час гасіння фосфору, шар піни необхідно наносити до досягнення надійного захисту фосфору від samozагорання, якщо можливо, то подати компресійну піну чи піну підвищеної

стійкості. При невеликих площах горіння фосфору використовувати пінні пересувні, стаціонарні установки пожежогасіння. За відсутності вогнегасної піни спробувати ізолювати фосфор від повітря порошками та піскосумішами до прибуття пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС.

Безпека праці. Ізолювати небезпечні зони радіусом не менше 100 м. Скорегувати цю відстань відповідно до результатів хімічної розвідки. Не допускати сторонніх осіб. У разі пожежі заходити в небезпечну зону в захисних засобах. Дотримуватись заходів пожежної безпеки. Усунути джерела вогню, іскор та забезпечити доступ до води. Надати першу медичну допомогу постраждалим. Евакуювати людей із сусідніх будівель, враховуючи напрямок руху токсичних продуктів горіння.

При гасінні пожеж легких металів заборонено використовувати воду. Гасити тільки порошковими сполуками при цьому їх подавання здійснювати через насадку-заспокоювач. При гасінні пожеж цього типу використовувати засоби індивідуального захисту органів дихання. Після покриття осередку горіння ВПСП, доцільно покрити всі горючі конструкції навколо шаром піни середньої кратності або компресійною піною. Необхідно покривати палаючий метал суцільним шаром порошку товщиною не менше 15 мм та з врахуванням шару горючих ошурок легкого металу, чим більший шар ошурок горючого металу, тим більший шар порошку, який може сягати 10 см і більше (приблизно на 25 мм шару ошурок 10 мм шару порошку).

Засоби для гасіння: ВПСП, сухий пісок, шлак, цемент, флюси, хлориди калію або натрію. Польовий шпат, карбонат натрію і бура, борна кислота та ґрунт підходять для гасіння невеликих загорянь.

Фосфор гасити піною або вогнегасним порошком. За наявності сполук фосфору в металевій посудині – заповнити її водою вище рівня фосфору.

Для утилізації розсипані ошурки сплавів легких металів зібрати без застосування вологі в суху металеву ємність; герметично закрити і відправити на переробку з дотриманням заходів безпеки.

З дотриманням заходів безпеки потрібно утилізувати матеріал. Зібрати стружку легких металів у суху та герметичну металеву ємність для переробки.

Висновки. Проведено аналіз вогнегасних речовин та засобів їх подачі для гасіння пожеж класу А, В, D та фосфорних сполук. Встановлено чинники, які негативно впливають на ефективність гасіння комбінованих пожеж.

Експериментально досліджено вплив товщини шару вогнегасного порошку на температуру горіння та охолодження магнію. Встановлено, що при товщині нанесеного шару порошку 10 мм та 12,5 мм, температура на межі метал/порошок становить 820 °C та, 812 °C відповідно. Ефективність охолодження під час процесу гасіння ошук сплаву магнію спостерігається при нанесенні шару 15 мм, де температура на межі метал/порошок дорівнює 150 °C, що на 40 °C нижча порівняно з товщинами 10 та 12,5 мм.

З використанням методики визначення необхідної кількості вогнегасного порошку та експериментальних даних для досягнення відповідного ізолювального ефекту визначено необхідну товщину шару вогнегасного порошку на основі хлориду натрію, меленого шлаку, амофосу, аеросилу та стеарату цинку ($\delta = 24$ мм) для досягнення безпечної для людини температури на границі з повітрям 80 °C.

Розроблено рекомендації з гасіння легких металів чи фосфорних сполук та сформульовано основні вимоги безпеки праці під час роботи з вогнегасними порошками та пінами/піною підвищеної стійкості. Вдосконалено технологію гасіння комбінованих пожеж за наявності легких металів чи сполук фосфору.

Список літератури

1. Звіт по науково-дослідній роботі «Вдосконалення технології гасіння комбінованих пожеж за наявності легких металів чи фосфорних сполук», виконавці: В. В. Ковалишин, Р. Б. Веселівський, В. М. Марич, Вол. В. Ковалиши, В. Л. Петровський, П. В. Пастухов, Н. Р. Великий, номер державної реєстрації № 0122U200807. Львів : ЛДУБЖД, 2023. 107 с.
2. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.thueringer-allgemeine.de/web/zgt/leben/blaulicht/detail/-/specific/Magnesium-Brand-richtet-bei-Sonneberg-Millionenschaden-an1529078490>
3. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://nto.pl/poteczny-pozar-fabryki-polmag-w-olszowej-plonie-47-ton-magnezu/ar/8962865>
4. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.firehouse.com/operations-training/hoselineswaterappliances/article/11300616/firefighter-training-extinguishing-magnesium-fires>
5. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://nv.ua/ukr/world/countries/u-nimechchi-ni-horiv-bavarskij-zavodbmw-2475328.html>
6. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://comments.ua/ua/world/593821.html>
7. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://p-p.com.ua/news/10544/>
8. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://zlochiv.net/12-rokiv-tomu-stalas-fosforna-avariia-pid-ozhydovom/>
9. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://magnolia-tv.com/news/36294-masshtabni-pozhezhi-i-vibukhi-v-kalinvci-i-balaklii-viyskovi-vse-znali-zazdalegid>
10. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.unian.ua/war/misiya-ekspertiv-obsye-pidtdverdila-vikoristannya-viyskami-rf-zaboronenoji-zbroji-novini-vtorgnennya-rosiji-v-ukrajinu-11903427.html>
11. Ковалишин В. В., Петровський В.Л., Веселівський Р. Б., Марич В. М. Ковалишин Вол. В., Великий Н.Р. Аналіз та проблеми гасіння комбінованих пожеж за наявності легких металів чи фосфорних сполук. Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення: матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю (Львів, 1жовтень 2022р.). Львів: ЛДУБЖД, 2022. С. 303–305.
12. Ковалишин В. В., Марич В. М., Веселівський Р. Б., Ковалишин Вол. В., Чернецький В. В. Оптимізація рецептури вогнегасного порошку спеціального призначення для комбінованого гасіння пожеж класу А, В та D. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека, (2(16)), С. 123–134. [https://doi.org/10.33269/nvc.2023.2\(16\).123-134](https://doi.org/10.33269/nvc.2023.2(16).123-134)
13. Ковалишин В. В., Марич В. М., Лозинський Р. Я., Пастухов П. В., Гусар Б. М. Комбіноване гасіння пожеж класу D та А, В. Пожежна безпека: зб. наук. праць. Львів, 2019. №35. С. 30–34. doi: 10.32447/20786662.35.2019.05
14. Баланюк В. М., Козяр Н. М., Гарасим'юк О. І. Застосування газоаерозольно-порошкових вогнегасних сумішей для захисту від запалювальних сумішей. ScienceRise. 2016. Т. 5, № 2 (22). С. 10–14.
15. Антонов А. В., Стилик І. Г. Методи випробувань вогнегасних порошків з визначення їх вогнегасної здатності за класом пожежі D. Вісник УкрНДІПБ. 2013. № 2 (28). С. 242–248.
16. Kravets O.V., Mozgovoy D. K. Wavelet Transform in remote sensing data processing : Engineer of the 3rd Millennium : The VII I Students' Scientific Conference (May, 2009, Dniepropetrovsk) Dniepropetrovsk, 2009. P. 49–50.
17. Zhenmin S., Weidong S., Yuzhao W., Long G. Analysis of Optical Properties of Off-Axis Reflective Volume Holographic Grating. Optics and Photonics Journal. 2016. No 6. P. 136-144;
18. Gusar, B., Kovalyshyn, V., Pozdieiev, S., Zemlianskyi, O. Myhalenko, K. Thermotechnical properties of the fireextinguishing powder for extinguishing materials based on magnesium alloy chips. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies This link is disabled., 2020, 2(10-104), pp. 46–53.

References

1. Report on the research work "Improving the technology of extinguishing combined fires in the presence of light metals or phosphorus compounds," performers: V.V. Kovalyshyn, R.B. Veselivskyi, V.M. Marych, Vol. V. Kovalyshyn, V. L. Petrovskyi, P. V. Pastukhov, N. R. Velykyi, state registration number No. 0122U200807. Lviv: LDUBZHD, 2023. 107 p.
2. [Electronic resource] - Mode of access to the resource: <https://www.thueringerallgemeine.de/web/zgt/leben/blaulicht/detail/-/specific/Magnesium-Brand-richttet-beiSonneberg-Millionenschaden-an1529078490>
3. [Electronic resource] - Resource access mode: <https://nto.pl/potezny-pozar-fabrykipolmag-w-olszo-wej-plonie-47-ton-magnezu/ar/8962865>
4. [Electronic resource] - Resource access mode: <https://www.firehouse.com/operationstraining/hoselin-eswaterappliances/article/11300616/firefighter-training-extinguishingmagnesium-fires>
5. [Electronic resource] - Mode of access to the resource: <https://nv.ua/ukr/world/countries/unimech-chini-horiv-bavarskij-zavodbmw-2475328.html> ;
6. [Electronic resource] - Mode of access to the resource: <https://comments.ua/ua/world/593821-.html>
7. [Electronic resource] - Resource access mode: <https://p-p.com.ua/news/10544/>
8. [Electronic resource] - Mode of access to the resource: <https://zlochiv.net/12-rokiv-tomustalas-fosforna-avariia-pid-ozhydovom/>
9. [Electronic resource] - Mode of access to the resource: <https://magnoliatv.com/news/36294-masshtabni-pozhezhi-i-vibukhi-v-kalinivci-i-balaklii-viyskovi-vse-znalizazdalegid>
10. [Electronic resource] - Mode of access to the resource: <https://www.unian.ua/war/misiyaekspertiv-obsye-pidtvirdila-vikoristannya-viyskami-rf-zaboronenoji-zbroji-novinivtorgnennya-rosiji-v-ukrajinu-11903427.html>
11. Kovalyshyn V.V., Petrovskyi V.L., Veselivskyi R.B., Marych V.M. Kovalyshyn Vol. V., Velykyi N.R. (2019) Analysis and problems of extinguishing combined fires in the presence of light metals or phosphorus compounds. Aktualni problemy pozhezhnoi bezpeky ta zapobihannia nadzvychainym sytuatsiiam v umovakh sohodennia: materialy vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii z mizhnarodnoiu uchastiu [Actual problems of fire safety and prevention of emergencies in today's conditions: materials of the all-Ukrainian scientific and practical conference with international participation]. (pp. 303-305) Lviv, October 1, 2022. Lviv: LDUBZHD, Ukraine [in Ukrainian].
12. Kovalyshyn V.V., Marych V.M., Veselivskyi R.B., Kovalyshyn Vol. V., Chernetskyi V. V. (2023) Optymizatsiia retseptury vohnehasnogo poroshku spetsialnogo pryznachennia dlia kombinovanoho hasinnia pozhezh klasu A, B ta D [Optimization of the formulation of special-purpose fire-extinguishing powder for combined extinguishing of fires of class A, B and D]Naukovi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka, Scientific Bullitin: Civil Protection and Fire Safety, (2 (16), 123-134. [https://doi.org/10.33269/nvc..2\(16\).123-134](https://doi.org/10.33269/nvc..2(16).123-134) [in Ukrainian].
13. Kovalyshyn V.V., Marych V.M., Lozynskyi R. Ya., Pastukhov P.V., Husar B.M.(2019) Kombinovane hasinnia pozhezh klasu D ta A, B [Combined extinguishing of fires of class D and A, B.] Pozhezhna bezpeka zb. nauk. prats Lviv,2019. №35. P. 30-34. doi:10.32447/20786662.35.2019.05 [in Ukrainian].
14. Balaniuk V.M., Koziar N.M., Harasymyuk O.I. (2016) Zastosuvannia hazoerozolno-poroshkovykh vohnehasnykh sumishei dlia zakhystu vid zapaliuvalnykh sumishei.[Application of gas-aerosol-powder fireextinguishing mixtures for protection against incendiary mixtures.] ScienceRise. 2016. T. 5, № 2 (22). 10-14 [in Ukrainian].
15. Antonov A.V., Stylyk I. G.(2013) Metody vyprobuvan vohnehasnykh poroshkiv z vyznachennia yikh vohnehasnoi zdatnosti za klasom pozhezhi D [Methods of testing fire extinguishing powders to determine their fire extinguishing ability by fire class D]. Visnyk UkrNIIPB. 2013. № 2 (28). 242-248 [in Ukrainian].
16. Kravets O.V., Mozgov oy D. K. Wavelet Transform in remote sensing data processing : Engineer of the 3rd Millennium : The VII I Students' Scientific Conference (May, 2009, Dniepropetrovsk) Dniepropetrovsk, 2009. P. 49–50.
17. Zhenmin S., Weidong S., Yuzhao W., Long G. Analysis of Optical Properties of Off-Axis Reflective Volume Holographic Grating. Optics and Photonics Journal. 2016. No 6. P. 136-144
18. Gusar, B., Kovalyshyn, V., Pozdieiev, S., Zemlianskyi, O. Myhalenko, K. Thermotechnical properties of the fireextinguishing powder for extinguishing materials based on magnesium alloy chips. Eastern-European Journal of Enterprise TechnologiesThis link is disabled., 2020, 2(10-104), pp. 46–53.

© В. В. Ковалишин, В. М. Марич,
Р. Б. Веселівський, Вол. В. Ковалишин,
Р. Я. Лозинський, 2024.

Науково-методична стаття.

Надійшла до редакції 13.05.2024.

Прийнято до публікації 12.06.2024.



О. В. Лазаренко, В. І. Луц

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна

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

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



o.lazarenko@ldubgd.edu.ua

АНАЛІЗ ЖИТТЄВИХ ПОКАЗНИКІВ ГАЗОДИМОЗАХИСНИКІВ ПІД ЧАС ТРЕНУВАННЯ В ТЕПЛОДИМОКАМЕРІ КОНТЕЙНЕРНОГО ТИПУ

Вступ. Ланка газодимозахисної служби здійснює виконання своїх функційних обов'язків за умови сильного задимлення, високих температур та значних фізичних навантажень, пов'язаних з перенесенням великої кількості пожежно-технічного обладнання, винесенням постраждалих, а також розбиранням завалів та елементів будівельних конструкцій. Отже, постійне тренування та підготовка особового складу (газодимозахисників) до дій за призначенням в умовах, наближених до реальних, є одним з ключових завдань.

Мета та задачі дослідження. Метою дослідження є визначення загального рівня підготовки газодимозахисників на тренажері контейнерного типу відповідно до медико-вікової групи з подальшим встановленням відповідних закономірностей та залежності частоти серцевих скорочень (ЧСС), часу виконання вправи та витрати повітря. Для досягнення поставленої мети необхідно проаналізувати результати виконання вправ в теплодимокamerі контейнерного типу газодимозахисниками різних медико-вікових груп та встановити загальні показники рівня фізичної витривалості, визначити ступінь витрати повітря газодимозахисниками різних медико-вікових груп, встановити оптимальну величину ЧСС для газодимозахисників різних медико-вікових груп.

Методи. В роботі використано методи аналітичних та експериментальних досліджень з подальшим опрацюванням отриманих статистичних результатів використовуючи відповідне програмне забезпечення.

Результати. Загалом в тестуванні взяло участь 544 газодимозахисники. Результати учасників тестування були розділені на 4 медико-вікові групи, однак в групі до 30 років окремо виділено результати виконання вправ здобувачів вищої освіти за спеціальністю 261 «Пожежна безпека». Результати показників ЧСС показали, що значна частина учасників тестувань з усіх медико-вікових груп перевищує критично допустимі показники. Цілком протилежний результат показали здобувачі вищої освіти, які з однієї сторони мають мінімально допустимий вік, але одночасно з тим здійснювали постійні тренування в рамках виконання навчального плану, лише 7% мали підвищений показник ЧСС. З огляду на те, що в переважній більшості газодимозахисник виконує роботу середньої важкості, в розрахунках часу роботи в апаратах на стисненому повітрі треба враховувати при двох видах навантажень і встановити такі параметри: відповідно 40 л/хв – середній вид навантаження та 80 л/хв – важке. Загальний аналіз фізіологічних показників тестування газодимозахисників різних медико-вікових груп показав, що середні показники часу виконання вправи практично не залежать від віку учасників, однак від 30 до 50% всіх учасників мають критичні показники ЧСС. Відповідно можна стверджувати, що більшість газодимозахисників проходять недостатньо тренувань в тепло-та димокamerі. Таким чином недостатня кількість тренувань особового складу порівняно з нормативними актами надалі може негативно вплинути на загальний рівень якості виконання газодимозахисниками дій за призначенням.

Висновки. За результатами досліджень встановлено, що від 30 до 50% газодимозахисників всіх медико-вікових груп мають критичні показники ЧСС, а витрата повітря газодимозахисниками при виконанні «важкої роботи» становить 80 л/хв, однак цей показник сильно відрізняється в газодимозахисників віком від 18-19 років, які здійснювали попередні тренування, та становить 58 л/хв. Додатково експериментально перевірено та запропоновано здійснювати обрахунок ЧСС за відповідною математичною залежністю.

Ключові слова: газодимозахисник, частота серцевих скорочень, витрата повітря, легенева вентиляція, навантаження.

ANALYSIS OF VITAL SIGNS OF FIREFIGHTERS DURING TRAINING IN A CONTAINER-TYPE THERMAL SMOKE CHAMBER

Introduction. The chain of the gas and smoke protection service performs its functional duties under conditions of heavy smoke, high temperatures and the need to carry out the physical load associated with the transfer of a large amount of fire-fighting equipment, the removal of victims, as well as the dismantling of rubble and elements of building structures. Accordingly, one of the key indicators is the constant training and preparation of personnel (firefighters) to perform the assigned actions in conditions close to real ones.

The purpose and objectives of the study. The purpose of the study is to determine the general level of training of firefighters on a container-type simulator by the medical age group, followed by the establishment of relevant patterns and dependence on heart rate, exercise time and air consumption.

To achieve the goal, it is necessary to analyse the results of exercises performed in a container-type heat-smoke chamber by firefighters of different medical age groups and establish general indicators of the level of physical endurance, determine the degree of air consumption by firefighters of different medical age groups, and establish the optimal heart rate for smoke detectors of different medical age groups.

Methods. The study uses methods of analytical and experimental research with further processing of the obtained statistical results using appropriate software.

Results. In total, 544 firefighters took part in the testing. The results of the test participants were divided into 4 medical and age groups, however, in the group under 30 years of age, the results of the exercises of higher education applicants for 261 "Fire Safety" were separately highlighted. The results of the heart rate indicators showed that a significant part of the test participants from all medical age groups exceeded the critically permissible indicators. Quite the opposite result was shown by the cadets who, on the one hand, have the minimum permissible age, but at the same time carried out constant training within the framework of the curriculum, only 7% had an increased heart rate (HR). Given the fact that the vast majority of firefighters perform work of medium difficulty, in practical calculations of time working in compressed air devices, two types of load should be taken into account and these parameters should be set, respectively 40 l/min (average type of load) and 80 l/min. General analysis of the physiological indicators of firefighters testing of different medical and age groups showed that the average indicators of exercise time practically do not depend on the age of the participants, but from 30 to 50% of all participants have critical heart rate indicators. Accordingly, it can be argued that the majority of firefighters carry out an insufficient level of training in heat and smoke chambers. Thus, reducing the frequency of personnel training following existing regulatory acts may in the future affect the overall quality level of the performance of actions assigned to firefighters.

Conclusions. According to the results of research, it was found that according to the heart rate from 30 to 50% of firefighters of all medical age groups have critical heart rate indicators, and the air consumption of firefighters when performing "heavy work" is 80 l/min, however, this indicator is very different in firefighters aged 18-19 years who have done preliminary training and is 58 l/min. In addition, it was experimentally verified and proposed to calculate the heart rate according to the corresponding mathematical dependence.

Keywords: firefighters, heart rate, air consumption, pulmonary ventilation, load

Вступ. З початком повномасштабного вторгнення військ РФ в Україну працівники ДСНС України працюють на межі своїх фізичних можливостей. Ланка газодимозахисної служби здійснює виконання своїх функційних обов'язків за умови сильного задимлення, високих температур та фізичних навантажень, пов'язаних з перенесенням великої кількості пожежно-технічного обладнання, винесенням постраждалих, а також розбором завалів та елементів будівельних конструкцій. Отже, постійне тренування та підготовка особового складу (газодимозахисників) до дій за призначенням в умовах, наближених до реальних, є одним з ключових завдань. Очевидно, що підтримання сталої фізичної форми та безперервне тренування адаптує та підвищує як фізичні показники газодимозахисників (частоту дихання, витривалість, швидкість тощо), так і морально-психологічні, адже їм часто доводиться працювати в незнайомих та специфічних умовах (побічний шум,

крики, вибухи, незнайоме та складне планування приміщень тощо) [1, 2].

Постановка проблеми. Відповідно до оновленого «Порядку організації газодимозахисної служби» [2], відбулися зміни щодо організації та проведення тренувань газодимозахисників в тепло-та димокамерах. Так сьогодні відповідні тренування повинні проводитися не частіше ніж один раз на рік, що однозначно негативно впливатиме на стан фізичної підготовки газодимозахисників. Разом з тим, на сьогодні відсутні будь-які нормативні документи, які регламентували б фізичні параметри (частоту серцевих скорочень, час виконання вправи, витрату повітря) та допустиме навантаження на газодимозахисника відповідно до медико-вікової групи.

Аналіз вітчизняних наукових досліджень [3-7] показує та підтверджує необхідність визначення вищезазначених параметрів під час тренувань газодимозахисників. Разом з тим, в роботі [3] автори

визначили особливості виконання вправ газодимозахисниками під час проведення тренувань в теплодимокамері та на свіжому повітрі. Додатково встановлено ступінь фізичного навантаження (легеневу вентиляцію, частоту серцевих скорочень) під час виконання вправ з різним навантаженням. Також встановлено мінімальний час виконання вправ під час різного виду тренувань. Однак автори не обґрунтували та не представили залежність частоти серцевих скорочень (ЧСС) від медико-вікової групи, до якої належали газодимозахисники. У фактичному продовженні попередньої роботи в дослідженні [4] автори зосередили увагу на тренуванні газодимозахисників на свіжому повітрі, де встановлено, що середній час виконання комплексу вправ становить 15 хв і загальна витрата повітря в межах 920 л. Додатково представлено детальний порядок виконання вправ на свіжому повітрі для проведення тестування газодимозахисників. Однак, як і в попередній роботі, відсутній аналіз медико-вікових груп та їхні фізіологічні показники під час виконання вправ.

В роботі [5] автори зосередили увагу на підготовці здобувачів вищої освіти закладів системи ДСНС та стадіях поступового навантаження здобувача для більш успішного та правильного тренування майбутнього газодимозахисника. Ґрунтовними також є дослідження висвітлені в роботі [6], адже автори визначили витрату повітря газодимозахисниками під час виконання вправ з різним ступенем важкості. Однак результати дослідження ґрунтуються на виконанні газодимозахисниками лише окремих видів вправ, а не загального комплексу, що відбувається під час виконання завдань за призначеннями.

Основоположною в вищезазначеному напрямку досліджень можна справедливо вважати роботу [7], оскільки автори привели ґрунтовні дослідження з використанням сучасного обладнання та на представниках різних медико-вікових груп. Автори обґрунтували та статистично довели використання показника витрати повітря в 80 л/хв для проведення розрахунків безпечних параметрів. Також запропоновано використовувати величину ЧСС в 165 уд./хв та 150 уд./хв як наближену до критичної для газодимозахисників до 40 років та більше відповідно. Однак, висвітлені результати досліджень не в повній мірі відповідають розподілу за медико-віковими групами. Відповідно до [8], норми фізичного навантаження для працівників ДСНС України повинні бути розділені на 6 груп. Додатково, можливості тренажера, що використовувався під час дослідження, дають змогу та автоматично встановлюють, відповідно до віку, максимальну межу ЧСС, при досягненні якої вважається, що газодимозахисник потребує додаткових тренувань

та поліпшення рівня фізичної витривалості. Таким чином було б доцільно провести саме подібний аналіз рівня фізичної підготовки та витривалості відповідно до медико-вікових груп газодимозахисників.

Постановка мети та завдань дослідження.

Відповідно до проведеного аналізу літературних джерел, метою дослідження є визначення загального рівня підготовки газодимозахисників на тренажері контейнерного типу відповідно до медико-вікової групи з подальшим встановленням відповідних закономірностей та залежності ЧСС, часу виконання вправи та витрати повітря.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- здійснити аналіз результатів виконання вправ в теплодимокамері контейнерного типу газодимозахисниками різних медико-вікових груп, відповідно до [8], та встановити загальні показники рівня фізичної витривалості;

- визначити витрату повітря газодимозахисниками різних медико-вікових груп;

- встановити допустиму середню величину ЧСС для газодимозахисників різних медико-вікових груп.

Виклад основного матеріалу.

Впродовж 2022 року з використанням теплодимокамери контейнерного типу (мобільний тренувальний комплекс MAW GmbH [9]) було проведено тестування рівня фізичної витривалості та життєвих показників газодимозахисників різних медико-вікових груп та підрозділів ДСНС України [7].

Мобільний тренувальний комплекс передбачає виконання газодимозахисником низки фізичних вправ в апараті на стисненому повітрі (АСП) та захисному одязі і спорядженні. Газодимозахисник після включення в АСП та фіксації першочергових показників розпочинає почергове виконання вправ на тренажерах нескінченна драбина, велоергометр, бігова доріжка, вертикальна тяга (Етап 1). Початок виконання кожної вправи фіксується електромагнітним ключем. Програмне забезпечення тренажера самостійно сигналізує про необхідність завершення виконання вправи на кожному з тренажерів при досягненні необхідного рівня навантаження. Після виконання першого етапу газодимозахисник переходить до проходження стежки-лабіринту з задимленням та світловими і шумовими ефектами (Етап 2). Початок виконання другого етапу та його завершення аналогічно фіксується електромагнітним ключем. По закінченні всіх етапів тестування, оператор фіксує кінцевий тиск в апараті і вправа вважається закінченою. Після виконання тестування загальні показники ЧСС газодимозахисника та інші дані можна роздрукувати у формі розгорнутого звіту формату

pdf. Детальний опис та функціонування тренажера наведений в [7, 9].

Слід зазначити, що відповідно до віку газодимозахисника тренажер виставляє «червону лінію» (максимально допустима ЧСС), яка, для прикладу стоїть на відмітці 200 уд/хв для газодимозахисника віком до 30 років. Вважається, що якщо показник ЧСС перейшов червону межу, то газодимозахисник потребує додаткового тренування з метою поліпшення рівня фізичної витривалості, оскільки його показники

критичні та можуть призвести до летальних наслідків в подальшій оперативній діяльності.

Результати дослідження. Загалом в тестуванні взяло участь 544 газодимозахисники. Відповідно до [8], результати учасників тестування були розділені на 4 медико-вікові групи, однак в групі до 30 років окремо виділено результати виконання вправ здобувачів вищої освіти за спеціальністю 261 «Пожежна безпека» (далі здобувачі), а саме 43 курсанти віком 18 років, другого року навчання, рис.1.



Рисунок 1 – Тестування курсантів спеціальності 261 «Пожежна безпека» на тренажері у мобільному тренувальному комплексі MAW GmbH

В таблиці 1 наведено усередненні показники всіх газодимозахисників за результатами виконання тестування

Таблиця 1

Усередненні показники результатів виконання тестування газодимозахисниками у мобільному тренувальному комплексі

Медико-вікова група	ЧСС, уд/хв	Час на виконання вправи, хв	Загальна витрата повітря, л
Курсанти (18+)	162	13	765
До 30 років	162	14	1114
30-35	155	14	1162
35-40	152	15	1248
40-45	144	14	1187

З таблиці 1 випливає, що середній час виконання всіх вправ для всіх медико-вікових груп є практично однаковим і становить 14 хв. Фактично, вік учасників тестувань не є перепорою для виконання запланованого рівня

навантаження. Враховуючи показники загальної витрати повітря та час виконання вправ можна побудувати графічну залежність витрати повітря під час виконання вправи газодимозахисниками різних медико-вікових груп, рис.2.

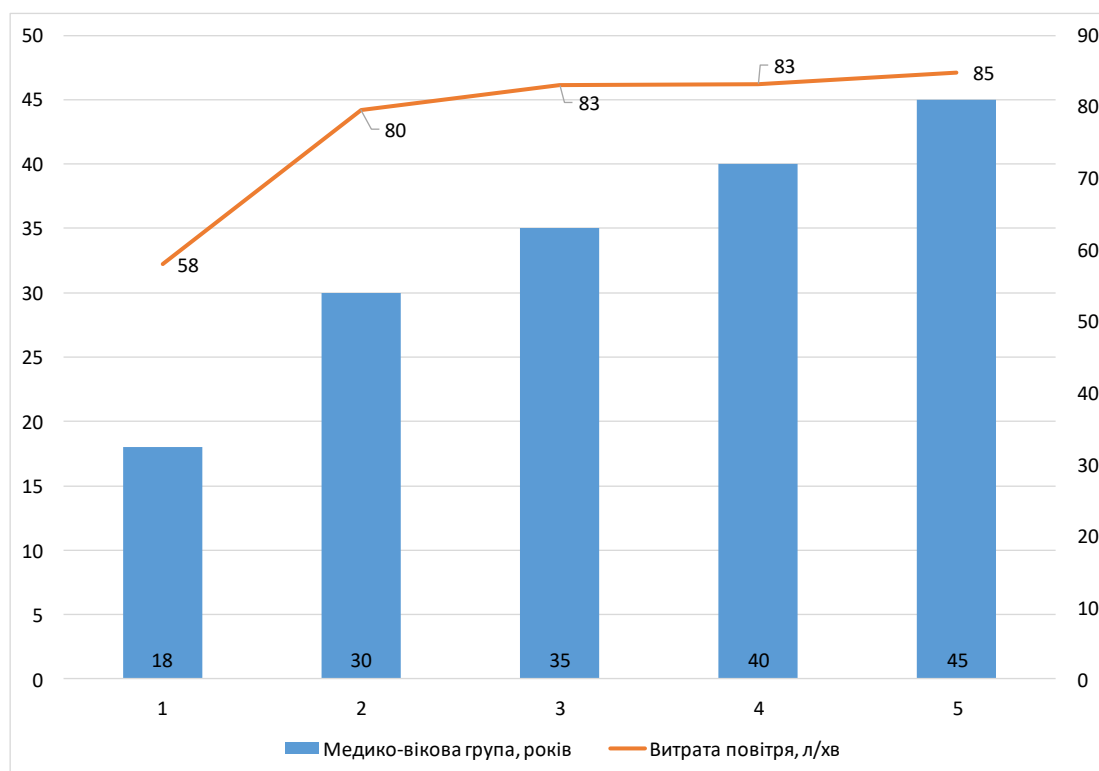


Рисунок 2 – Графічне зображення рівня витрати повітря залежно від віку (медико-вікової групи) газодимозахисника за умови виконання фізичного навантаження в теплодимокamerі

З огляду на результати графічної залежності (рис.2), можна однозначно стверджувати, що витрата повітря під час виконання вправ в теплодимокamerі газодимозахисниками різних медико-вікових груп в середньому рівний 80 л/хв, що й підтверджено попередніми дослідженнями [7]. Однак, додатковий аналіз результатів тестування також показує, що здобувачі вищої освіти, які здійснювали безперервні фізичні тренування впродовж року навчання, затратили в середньому 58 л/хв повітря на виконання аналогічних вправ. Разом з тим газодимозахисники у віці 45 років та старші витрачали в середньому 85 л/хв.

Загалом часові показники виконання вправ та витрати повітря – це індивідуально-фізіологічні параметри, які не критично впливатимуть на самопочуття газодимозахисників. Більш критичним параметром, за яким необхідно слідкувати під час виконання вправ, є ЧСС, адже саме цей показник визначає рівень фізичної витривалості та тренуваності газодимозахисника і при перевищенні якого може спостерігатися погіршене самопочуття, підвищення артеріального тиску і, як наслідок, втрата свідомості, паніка. Як зазначалося вище, мобільний тренувальний комплекс MAW GmbH визначає критичні межі показника ЧСС залежно від віку газодимозахисника.

Враховуючи [11, 12], де запропоновано порядок визначення максимального показника ЧСС

залежно від віку, а також беручи напроцювання нормативно-правових документів, пропонується адаптувати зазначені залежності до умов проведення тренувань газодимозахисників. Таким чином, для більш точного визначення критерію максимально допустимого показника ЧСС для різних медико-вікових груп пропонується використовувати таку формулу (1) для розрахунку:

$$ЧСС_{опт}^{ТДК} = (180 - n) + 10 \div 15 \quad (1)$$

де, $ЧСС_{опт}^{ТДК}$ – оптимальна середня частота серцевих скорочень під час тренувань газодимозахисника в теплодимокamerі уд./хв; n – повний вік газодимозахисника в роках; $10 \div 15$ – варіативний ненормований показник, приймається в межах від 10 до 15.

Використання відповідної формули (1) дає можливість чітко встановити оптимальну середню ЧСС, газодимозахисника і отримані значення корелюються з середніми показниками ЧСС зазначеними таблиці 1. Таким чином обробка результатів виконання вправ газодимозахисниками на мобільному тренувальний комплекс MAW GmbH та порівняння отриманих середніх показників ЧСС з результатами розрахунку за формулою (1) дали такі результати, рис.3.

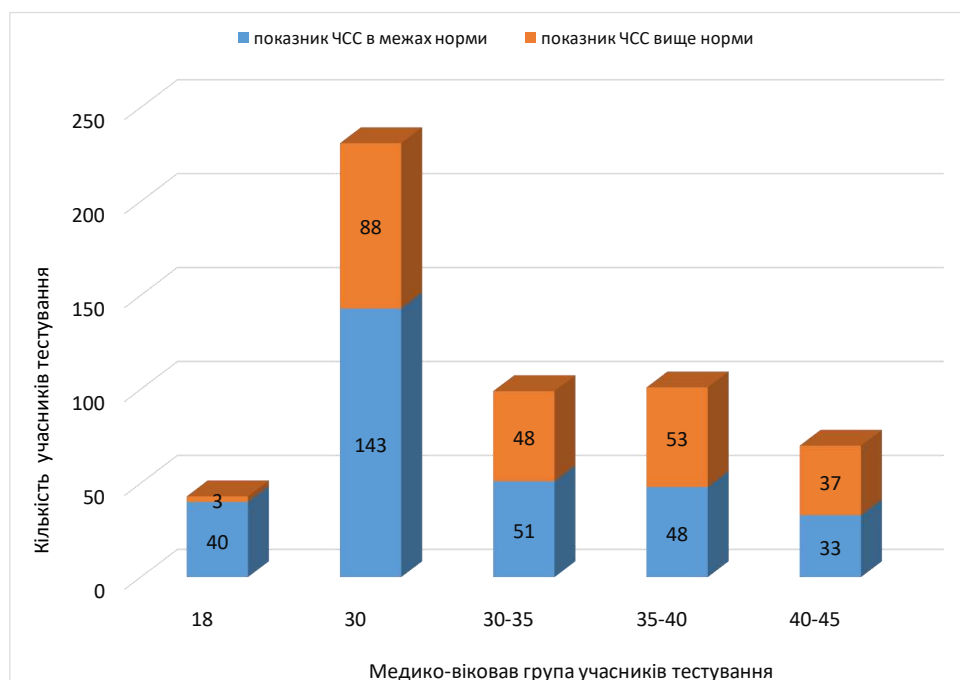


Рисунок 3 – Розподіл учасників тестування у відповідності до медико-вікових груп та показників частоти серцевих скорочень

Результати показників ЧСС показали, що значна частина учасників тестувань з усіх медико-вікових груп перевищує критично допустимі показники. З наведеного вище рис.3. можна зробити висновок, що переважна більшість газодимозахисників – це все ж таки люди у віці до 30-35 років. Однак показники ЧСС під час виконання тестування (всіх медико-вікових груп) перебувають поза нормою в 35-50% учасників, що говорить про їх недостатній рівень підготовки та необхідність додаткових тренувань в умовах максимально наближених до реальних. Цілковито протилежний результат показали здобувачі вищої освіти, які з однієї сторони мають мінімально допустимий вік, але одночасно з тим здійснювали постійні тренування в рамках

виконання навчального плану (один раз на місяць – свіже повітря, один раз на місяць – тепло-димкамера), лише 7% мали підвищений показник ЧСС.

Загалом, відповідно до результатів дослідження [7], оптимальний показник ЧСС для учасників тестування становить 165 уд./хв та 150 уд./хв. Враховуючи зазначені результати та наведені показники в табл.1, пропонується відобразити отримані результати відповідно до медико-вікових груп, зазначених в [8]. Додатково, враховуючи напрацювання [3-5], виконання вправ в теплодимкамері контейнерного типу необхідно віднести до «важкої роботи». Таким чином ми отримаємо загальну таблицю оптимальних показників, табл.2.

Таблиця 2

Оптимальні фізіологічні показники виконання вправ в теплодимкамері за зразком мобільного тренувального комплексу MAW GmbH

Медико-вікова група	ЧСС, уд./хв	Витрата повітря, л/хв	Час на виконання вправи, хв	Загальна витрата повітря, л
Здобувачі профільної освіти (18+)	170-177	60	14	800
До 30 років	160-175	80		1200
30-35	150-160			1300
35-40				
40-45	140-150	85		

З огляду на те, що в переважній більшості газодимозахисник виконує роботу середньої важкості [3, 5], в практичних розрахунках часу роботи в АСП все ж таки треба враховувати два види навантаження і встановити ці параметри,

відповідно 40 л/хв [10] (середній вид навантаження) та 80 л/хв (важка робота).

Загальний аналіз фізіологічних показників тестування газодимозахисників різних медико-вікових груп показав, що середні показники часу

виконання вправи практично не залежать від віку учасників, однак від 30 до 50% всіх учасників мають критичні показники ЧСС. Відповідно, можна стверджувати, що більшість газодимозахисників здійснюють недостатній рівень тренувань в тепло-та димокамері. Таким чином зменшення періодичності тренування особового складу, згідно з [2], подальше може вплинути на загальний рівень фізичної підготовки газодимозахисників. Яскравим прикладом відповідному твердженню є результати виконання вправ здобувачами вищої освіти, показник витрати повітря яких суттєво відрізняється від медико-вікової групи, до якої вони відносяться.

Висновок.

Загалом отриманні результати дослідження дають змогу сформулювати такі висновки:

- за показником ЧСС від 30 до 50% газодимозахисників всіх медико-вікових груп мають критичні показники ЧСС, що потребує додаткової уваги. Додатково, як показують результати експерименту, при однаковому навантаженні та часі роботи в АСП, газодимозахисники, які мали частіші тренування, витрачають на 20-25 л/хв менше повітря. Таким чином в них залишається більший запас повітря на виконання дій за призначенням;

- витрата повітря газодимозахисниками при виконанні «важкої роботи» становить 80 л/хв, однак цей показник значно відрізняється в газодимозахисників віком від 18-19 років, які здійснювали попередні тренування, та становить 58 л/хв;

- для встановлення оптимального середнього показника ЧСС відповідно до медико-вікової групи пропонується використовувати формулу

$$ЧСС_{опт}^{ТДК} = (180 - n) + 15.$$

Подальші дослідження повинні бути спрямовані:

- на встановлення впливу антропометричних даних газодимозахисника (зріст, вага, життєва ємність легень) на показники виконання вправ в тепло-та димокамері, на свіжому повітрі;

- на врахування показників витрати повітря 40 та 80 л/хв у розрахунках безпечних параметрів роботи ланки газодимозахисної служби в непридатному для дихання середовищі.

Список літератури

1. 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 України від 26.04.2018 року №340

2. Порядок організації роботи органів управління та підрозділів, закладів освіти системи ДСНС під час підготовки особового складу, гасіння пожеж, ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій та інших небезпечних подій в умовах екстремальних температур, задимленості, загазованості, радіоактивного, хімічного забруднення та біологічного зараження. Наказ МВС України від 25.09.2023 №780

3. Луц В.І, Пархоменко Р.В., Луц І.В. Аналіз підготовки газодимозахисників ДСНС України та шляхи підвищення її ефективності. Пожежна безпека: Збірник наукових праць ЛДУБЖД. 2017. № 30. С. 114-125. <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/download/20/17/>

4. Луц В.І, Панчишин Ю.І. Дослідження навантаження на газодимозахисника під час проведення змагання на кращу ланку газодимозахисної служби. Пожежна безпека: Збірник наукових праць ЛДУБЖД. 2023. 43. С. 88-98. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.43.2023.11>

5. Стрілець В. М., Ковальов П. А., Бородич П. Ю. Порівняльний аналіз закономірностей витрати повітря під час роботи рятувальників в АСП. Збірник наукових праць, НУЦЗ. 2015. №37. С. 207-216. https://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfFireSafety/vol37/Ppb_2015_37_37.pdf

6. Бородич П.Ю. Оцінка функціонального стану та динамічної стійкості газодимозахисників. Збірник наукових праць: НУЦЗ. 2012. №32. С. 32-36. <https://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfFireSafety/vol32/borodich.pdf>

7. Скоробагатько Т., Єременко С., Пруський А., Савельєв І., Стрілець В., Сидоренко, В. Порівняльний аналіз діяльності газодимозахисників різних вікових груп. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. 2023. №1(15), С. 41–55. [https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1\(15\).41-55](https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1(15).41-55)

8. Про затвердження Порядку організації службової підготовки осіб рядового і начальницького складу служби цивільного захисту. Наказ МВС №511 від 15.06.2017

9. Офіційний сайт виробника тренажерів та контейнерів MAW GmbH. URL: <https://www.mawonline.de/index.php/de/leistungen/feuerwehrbereich/mobile-loesungen>

10. Довідник керівника гасіння пожежі; за заг. ред. В.С.Кропивницького. К:ТОВ Літера-Друк, 2016. 320с.

11. What is a normal heart rate? Your pulse, both at rest and during exercise, can reveal your risk for heart attack and your aerobic capacity. URL: <https://www.health.harvard.edu/heart-health/what-your-heart-rate-is-telling-you>.

12. Target Heart Rate and Estimated Maximum Heart Rate. URL: <https://www.cdc.gov/physicalactivity/basics/measuring/heartrate.htm>

References

1. Pro zatverdzhennia Statutu dii u nadzvychainykh sytuatsiakh orhaniv upravlinnia ta pidrozdiliv Operatyvno-riatuvalnoi sluzhby tsyvilnoho zakhystu ta Statutu dii orhaniv upravlinnia ta pidrozdiliv Operatyvno-riatuvalnoi sluzhby tsyvilnoho zakhystu pid chas hasinnia pozhezh [On Approval of the Statute of Actions during emergencies governing bodies and subdivisions of Operations and Rescue Service of Civil protection during Fire Fighting] April 26, 2018, №340. [in Ukrainian].
2. Poriadok orhanizatsii roboty orhaniv upravlinnia ta pidrozdiliv, zakladiv osvity systemy DSNS pid chas pidhotovky osobovoho skladu, hasinnia pozhezh, likvidatsii naslidkiv nadzvychainykh sytuatsii ta inshykh nebezpechnykh podii v umovakh ekstremalnykh temperatur, zadymlenosti, zahazovanosti, radioaktyvnoho, khimichnoho zabrudnennia ta biolohichnoho zarazhennia [The procedure for organizing the work of management bodies and divisions, educational institutions of the State Emergency Service system during personnel training, firefighting, liquidation of the consequences of emergencies and other dangerous events in conditions of extreme temperatures, smoke, gassing, radioactive, chemical pollution and biological contamination] September 25, 2023, №780. [in Ukrainian].
3. Lusch V.I., Parkhomenko R.V., Lusch I.V. (2017) Analiz pidhotovky hazodymozakhysnykiv DSNS Ukrainy ta shliakhy pidvyshchennia yii efektyvnosti. [Analysis of the training of gas and smoke protection officers of the State Emergency Service of Ukraine and ways to increase its efficiency]. Fire Safety, 30. 114-125. <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/download/20/17/>
4. Lushch, V., Panchyshyn, Y. (2023) Doslidzhennia navantazhennia na hazodymozakhysnyka pid chas provedennia zmahannia na krashchu lanku hazodymozakhysnoi sluzhby. [Study of the effect of fire on experimental sewing and production areas screened with protective panels]. Fire Safety, 43, 88-98. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.43.2023.11>
5. Strelets V. M., Kovalev P. A., Borodych P. Yu. (2015) Porivnialnyi analiz zakonmirmostei vytraty povitria pid chas roboty riatuvalnykiv v ASP. [Comparative analysis of patterns of airflow during the work of rescuers in emergency medical services]. Collection of scientific works, Kharkiv: NUTSZ, 37. 207-216. https://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfFireSafety/vol37/Ppb_2015_37_37.pdf
6. Borodych P.Yu. (2012) Otsinka funktsionalnoho stanu ta dynamichnoi stiikosti hazodymozakhysnykiv. [Assessment of the functional state and dynamic stability of gas and smoke detectors]. Collection of scientific papers, Kharkiv: NUTSZ, №32. 32-36. <https://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfFireSafety/vol32/borodich.pdf>
7. Skorobagatko T., Eremenko S., Pruskyi A., Saveliev I., Strelets V., Sydorenko V. (2023) Porivnialnyi analiz diialnosti hazodymozakhysnykiv riznykh vikovykh hrup. [Comparative analysis of the activity of gas and smoke detectors of different age groups]. Civil Protection and Fire Safety, №1(15), 41–55. [https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1\(15\).41-55](https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1(15).41-55)
8. Pro zatverdzhennia Poriadku orhanizatsii sluzhbovoi pidhotovky osib riadovoho i nachalnytskoho skladu sluzhby tsyvilnoho zakhystu [On the approval of the Procedure for the Organization of Service Training of Private and Executive Staff of the Civil Protection Service] №. 511 June 16, 2017. [in Ukrainian].
9. The official website of the manufacturer of simulators and containers MAW GmbH. Retrieved from <https://www.mawonline.de/index.php/de/leistungen/feuerwehrbereich/mobile-loesungen>
10. Kropyvnytskyi V.S. (Ed.) (2016). Dovidnyk kerivnyka hasinnia pozhezhi [Handbook of the head of fire extinguishing]. Kyiv: TOV Litera-Druk [in Ukrainian].
11. What is a normal heart rate? Your pulse, both at rest and during exercise, can reveal your risk for heart attack and your aerobic capacity. Retrieved from <https://www.health.harvard.edu/heart-health/what-your-heart-rate-is-telling-you>.
12. Target Heart Rate and Estimated Maximum Heart Rate. Retrieved from <https://www.cdc.gov/physicalactivity/basics/measuring/hearttrate.htm>.

© О. В. Лазаренко, В. І. Луш, 2024.

Науково-методична стаття.

Надійшла до редакції 12.02.2024.

Прийнято до публікації 12.06.2024.



I. А. Оношко¹, В. В. Ніжник², О. М. Чекригін³, Т. М. Шналь⁴

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

²Інститут державного управління та наукових досліджень ЦЗ, м. Київ, Україна

³Одеський державний університет внутрішніх справ, м. Одеса Україна

⁴Національний університет "Львівська Політехніка", м. Львів, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5793-1680> – І. А. Оношко

<https://orcid.org/0000-0003-3370-9027> – В. В. Ніжник

<https://orcid.org/0009-0007-4921-3348> – О. М. Чекригін

<https://orcid.org/0000-0002-4226-9513> – Т. М. Шналь



i.onoshko@ldubgd.edu.ua

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ ПОЧАТКУ ЕВАКУАЦІЇ ЛЮДЕЙ НА ПОЖЕЖІ

Проблема. Невпинний розвиток суспільства, форм та методів будівництва, технічний і технологічний прогрес створили нові виклики для проведення досліджень процесів евакуації під час пожеж чи надзвичайних ситуацій. Спектр таких досліджень в умовах сьогодення формувався в парадигмі потреб не лише розв'язання математичних рівнянь із врахуванням поведінкових та психофізіологічних потреб і особливостей учасників, але й моделювання нових правил евакуації, які впливають на взаємодію учасників евакуації з навколишнім середовищем і між собою. Очевидно, що рівень індивідуального пожежного ризику залежить від наявності технічних засобів протипожежного захисту та в деякій мірі це полегшує «навантаження» на керівників (власників) суб'єктів господарювання, але не завжди впливає на проведення вчасної та безпечної евакуації під час пожежі. Можна стверджувати, що не в повному обсязі є дослідженими процеси впливу часу початку евакуації на величину індивідуального пожежного ризику відповідно до умов сьогодення.

Мета роботи. Аналіз сучасного стану досліджень визначення часу початку евакуації, методів його розрахунку та аналіз експериментальних досліджень для виявлення і узагальнення чинників, що впливають на значення часу початку евакуації людей під час пожежі.

Методи дослідження. У роботі використані: статистичний метод і метод теоретичного узагальнення та вирішені такі завдання: проаналізовано стан забезпечення пожежної безпеки об'єктів захисту; проаналізовано вітчизняні нормативні документи щодо визначення часу початку евакуації; проаналізовано закордонні джерела і рішення щодо розрахунку часу початку евакуації людей на пожежі та експериментальних досліджень процесів евакуації.

Основні результати дослідження. Виконаний аналіз дасть змогу отримати глибоке розуміння аспектів пожежної безпеки об'єктів захисту і виявити слабкі місця у застосованих методах визначення необхідного часу початку евакуації людей з метою мінімізації індивідуального пожежного ризику.

Висновки. Ризики, що призводять до загибелі людей на пожежах, демонструють потребу в дослідженні, розробці і впровадженні більш ефективних форм та методів запобігання виникненню надзвичайних ситуацій. Встановлено, що наукових обґрунтувань розрахунку часу початку евакуації все ще мало і відповідно розкриття особливостей впливу чинників (об'єм приміщення, пожежне навантаження, кількість та характеристика людей) на значення часу початку евакуації людей під час пожежі є важливим науковим завданням, вирішення якого є підґрунтям для удосконалення методу оцінювання рівня безпеки людей під час пожежі.

Ключові слова: протипожежний захист, час початку евакуації, евакуація, індивідуальний пожежний ризик.

ANALYSIS OF RESEARCH DETERMINED EVACUATION START TIME PEOPLE ON FIRE

Introduction. The constant development of society, forms and methods of construction, and technical and technological progress have created new challenges for conducting research on evacuation processes during fires or emergencies. The spectrum of such research in today's conditions was formed in the paradigm of the needs not only of solving mathematical equations taking into account the behavioural and psychophysiological needs and characteristics of the participants, but also of modelling new evacuation rules that affect the interaction of evacuation participants with the environment and with each other. It is obvious that the level of individual fire risk depends on the availability of technical means of fire protection, and to some extent, this eases the "load" on managers (owners) of business entities but does not always affect timely and safe evacuation during a fire. It can be argued that the processes of influence of the time of the start of evacuation on the value of the individual fire risk in accordance with today's conditions have not been fully investigated.

Purpose. Analysis of the current state of research on the determination of the time of the start of evacuation, methods of its calculation and analysis of experimental studies to identify and generalise the factors affecting the value of the time of the start of evacuation of people during a fire.

Methods: The work used: a statistical method and a method of theoretical generalisation, and the following tasks were performed: the state of ensuring fire safety of protection objects was analysed; domestic regulatory documents regarding the determination of the time of the start of evacuation were analysed; analysed foreign sources and decisions regarding the calculation of the time of the start of the evacuation of people on fire and experimental studies of evacuation processes.

Results. The performed analysis will allow us to gain a deep understanding of the aspects of fire safety of protected objects and identify weaknesses in the applied methods of determining the necessary time to start the evacuation of people to minimize individual fire risk.

Conclusions. Risks leading to the death of people in fires demonstrate the need for research, development and implementation of more effective forms and methods of preventing emergencies. It has been established that there are still few scientific grounds for calculating the time of the start of evacuation and, accordingly, the disclosure of the features of the influence of factors (volume of the room, fire load, number and characteristics of people) on the value of the time of the start of the evacuation of people during a fire is an important scientific task, the solution of which is the basis to improve the method of assessing the level of people's safety during a fire.

Keywords: fire protection, pre-evacuation time, evacuation, individual fire risk.

Постановка проблеми. Пожежна безпека будівель і споруд характеризується рівнем безпеки людей та (або) матеріальних цінностей, а також рівнем наслідків (збитків) від настання небезпечних подій [1].

Одним з останніх прикладів пожежі з загибеллю великої кількості людей через службову недбалість і грубе порушення вимог правил пожежної безпеки в Україні є пожежа в одному з навчальних закладів м. Одеси, яка виникла 4 грудня по вул. Троїцька, 25. Загоряння виникло об 10 годині зранку на 3-му поверсі 6-поверхової будівлі в Одеському коледжі економіки, права та готельно-ресторанного бізнесу. Крім коледжу в будівлі були розташовані такі науково-дослідні установи, як Інститут морської біології НАН України, Одеська філія інституту археології НАН України, підрозділи Фізико-хімічного інституту ім. Богатського НАН України та декілька інших установ і приватні компанії. У будівлі на момент події перебувало близько 400 осіб, зокрема саме у коледжі перебувало 230 осіб, із яких 165 студентів. Перші підрозділи, які прибули до місця виклику,

констатували полум'яне горіння на площі близько 700 м² на третьому поверсі будівлі та засвідчили загрозу розповсюдження вогню по всій площі будівлі. Станом на 11:40 – площа пожежі перевищила 2 тис. м² і силами ДСНС було евакуйовано 40 осіб, лише об 13:00 було завершено повну евакуацію людей з будівлі. Всього вдалося врятувати 40 осіб, з них 22 особи виведено по внутрішніх сходових клітках та 18 – за допомогою драбин і пожежних автопідіймачів. Внаслідок пожежі загинуло 16 та 30 осіб травмовано [2,3].

У «Звіті урядової комісії з розслідування причин виникнення пожежі в Одеському коледжі економіки, права та готельно-ресторанного бізнесу, що виникла 4 грудня 2019 року, утвореної, відповідно до розпорядження Кабінету Міністрів України від 6 грудня 2019 року № 1223-р» [4], основною версією причини пожежі стало загоряння побутового електрообладнання, ймовірно обігрівача, але основною причиною загибелі людей було абсолютне порушення правил пожежної безпеки: від порушення протипожежного режиму на об'єкті з масовим

перебуванням людей, унеможливлення проведення оповіщення людей про пожежу і проведення безпечної евакуації до відсутності технічних засобів протипожежного захисту.

Разом з тим, як показує практика, не лише наявність технічних засобів протипожежного захисту на об'єкті з масовим перебуванням людей сприяє проведенню швидкої та безпечної евакуації людей. В даному випадку студенти та персонал були знайомі архітектурно-планувальними особливостями будівлі і орієнтувались по наявних шляхах евакуації. Разом з тим, відповідно до виявлених порушень в ході досудового слідства за фактом даної пожежі – саме грубе ігнорування виконання організаційних заходів: не забезпечення встановлення протипожежного режиму на об'єкті; не проведення інструктажів та навчань персоналу і здобувачів освіти; не проведення періодичних відпрацювань порядку дій на випадок пожежі та не вміння користуватись первинними засобами пожежогасіння тощо – призвело до затримки початку проведення евакуації, втрати часу для проведення безпечної евакуації і в подальшому до важких наслідків.

Очевидно, що наявність технічних засобів протипожежного захисту на об'єктах значно спрощує та до певної міри полегшує «навантаження» на керівників (власників) суб'єктів господарювання в частині забезпечення безпеки людей, але не завжди впливає на проведення вчасної та безпечної евакуації під час пожежі.

Таким чином, можна стверджувати, що не в повному обсязі є дослідженими процеси впливу часу початку евакуації на величину індивідуального пожежного ризику відповідно до умов сьогодення. Зокрема не має належного наукового обґрунтування формули розрахунку часу початку евакуації у [1], що обумовлює актуальність досліджень у визначеному напрямку.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Питаннями проведення безпечної евакуації людей під час пожеж науковці країн Європи та Сполучених Штатів Америки згідно з офіційними джерелами активно почали займатись з 30-х років минулого століття. Вперше у звіті в 1935 році [5] було встановлено номінальний час (2,5 хв) повної евакуації людей з приміщення осередку пожежі – за основу у звіті було взято час евакуації глядачів (2,5 хв) під час пожежі в театрі Empire Palace в Единбурзі у 1911 році. Таким чином, вперше був проведений розрахунок і встановлений числовий показник пропускну здатності – 40 осіб за хвилину на 0,53 м

ширини евакуаційного виходу.

Традиційно в Європі та Сполучених Штатах Америки розрахунок часу евакуації фактично проводився за допомогою простих рівнянь, що базувались на концепції, згідно з якою рух людей прирівнювали до руху рідин. Основними факторами, які враховувалися під час розрахунків евакуації, були: відстань до виходу, швидкість руху та розмір потоку людей через основні шляхи евакуації [6].

З 90-х років минулого століття і донині моделювання процесів евакуації розвивається у напрямку поступового впровадження поведінкових факторів у розрахункові моделі. Це відображається в поступовому переході від моделей на основі математичних рівнянь до моделювання процесів взаємодії учасників процесу евакуації у випадку пожежі [7].

Невпинний розвиток суспільства, форм та методів будівництва, технічний і технологічний прогрес створили нові виклики для проведення досліджень евакуаційних процесів під час пожеж чи інших надзвичайних ситуацій. Спектр таких досліджень в умовах сьогодення формувався в парадигмі потреб не лише розв'язання математичних рівнянь із врахуванням поведінкових та психофізіологічних потреб і особливостей учасників, але й моделювання нових правил евакуації, які впливають на взаємодію учасників евакуації з навколишнім середовищем і між собою. На сьогодні в країнах Європи, в Австралії, Канаді та Сполучених Штатах Америки використовують різні моделі для відображення поведінки людини під час пожежі. У працях авторів [7-9] описані та винесені на обговорення чотири поведінкові моделі, які використовують під час проведення розрахунків часу евакуації, а саме: модель «послідовності поведінки»; модель «роль-правило»; афіліативна модель; модель соціального впливу (залежності).

Ці моделі є теоретичним підґрунтям якісного інтерпретування поведінкових та психо-емоційних особливостей, які впливають на прийняття рішень людьми під час евакуації при пожежі. На сьогодні у відповідності до міжнародних норм, зокрема ISO TR16738 [10], BS PD 7974-6 [11], the Society of Fire Protection Engineering Handbook [12] під час проведення розрахунків часу евакуації використовується модель розрахунку часу проведення повної евакуації, кожний часовий відрізок якої представляє окрему фазу процесу, а представлення поведінки людей здійснюється шляхом підсумовування цих часових відрізків [13]. (рис. 1).

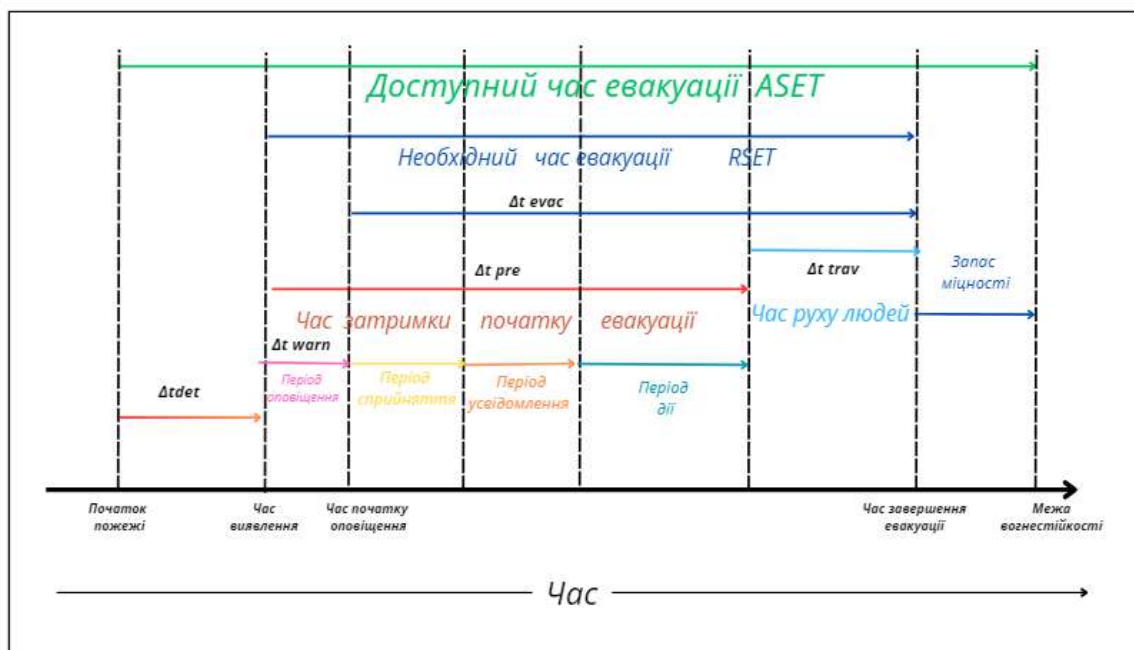


Рисунок 1 – Модель розрахунку процесу евакуації

Відповідно до рис. 1, необхідний час проведення безпечної евакуації розраховується за формулою:

$$RSET = \Delta t_{det} + \Delta t_{warn} + \Delta t_{pre} + \Delta t_{trav} \quad (1)$$

де Δt_{det} – часовий відрізок від початку пожежі до моменту її виявлення; Δt_{warn} – часовий відрізок від моменту виявлення пожежі до початку централізованого оповіщення людей про пожежу; Δt_{pre} – час затримки початку евакуації людей, який складається з деяких етапів: часовий період сприйняття інформації про небезпеку, часовий період усвідомлення небезпеки, часовий період дії (реакції) – період після того, як люди розпізнають сигнали тривоги та починають на них реагувати, але до початку фази руху; Δt_{trav} – це час руху людей до безпечного місця або назовні [12-13].

В роботі проведено аналіз визначення саме часу початку евакуації, визначень поняття якого у закордонній літературі є декілька, а саме: pre-travel activity time – час перед вирушенням, pre-movement time – час до початку руху, pre-evacuation time – час перед початком евакуації, delay time to start – час затримки перед початком руху [14-17]. Але науковці однакові, що власне термін початку евакуації повинен охопити весь спектр аналізу перед прийняттям рішення і порядок прийняття рішень людьми перед їх свідомою евакуацією, а саме: збір інформації про підтвердження небезпечної події, підготовка до евакуації, пов'язана зі збором особистих речей або завершенням операційної діяльності, допомога чи оповіщення інших людей, гасіння

пожежі тощо. Саме ці дії спричиняють затримку руху людини в безпечне місце, тому ця фаза у математичних моделях розрахунку часу евакуації вказується як час затримки, час очікування або час реакції (дії) [18].

В наукових працях автори зазначають, що час початку евакуації може залежати від кількох внутрішніх і зовнішніх факторів, таких як рівень очевидної необхідності евакуації [19], особисті якості людей, їх походження, гендер тощо [20], можливий досвід потерпання від пожежі, рівень підготовки, тип систем протипожежного захисту об'єкта, рівень виконання організацій заходів та загального менеджменту забезпечення пожежної безпеки [31] тощо.

В своїй роботі автор [22] зазначає, що під час моделювання процесів евакуації можуть бути використані різні підходи визначення часу початку евакуації, але до прикладу, в роботах [24-26] для проведення комп'ютерного моделювання часу повної евакуації людей – значення часу початку евакуації для різних категорій осіб було фіксоване (табличний показник) або псевдовипадкове число, отримане з довільного розподілу. Такий підхід в моделюванні часу евакуації передбачає, що люди, яких необхідно евакуювати, повинні чекати на своєму початковому місці, доки не мине певний час затримки, а потім починають цілеспрямований рух до безпечного місця.

Альтернативним варіантом моделювання евакуації в роботі [26] було запропоновано визначення двох окремих часових відрізків затримки/очікування окремими особами або групами осіб, що представило час розпізнавання та

час відповіді (реакції). В цьому випадку значення були фіксовані або такі, що отримані за допомогою генератора псевдовипадкових значень із заздалегідь визначених розподілів.

Як показав аналіз в роботах [12, 27-29] досліджувались процеси евакуації із використанням найбільш складного підходу до моделювання, а саме визначення чіткої моделі поведінки відповідно до типу задіяного населення, тип будівлі, пильність людей, рівень знайомства з будівлею та набору психо-емоційних особливостей та можливих реакцій, які демонструватиме індивід або група індивідуумів. Загалом відомі моделі евакуації дають змогу використовувати різні типи розподілу, такі як рівномірний, нормальний, логарифмічний нормальний, усічений нормальний, гамма-, бета-, трикутний, метод Вейбулла, експоненціальний, метод Гамбеля [23-28, 30].

У різних дослідженнях закордонних авторів було виявлено, що час початку евакуації може бути апроксимований у багатьох сценаріях за допомогою нормального або логарифмічного розподілу [29]. Таким чином, вибір користувачів моделі з точки зору розподілів, прийнятих для представлення часу початку евакуації, залежить від наявності даних для цього конкретного типу будівлі та населення (користувачів, відвідувачів), що розглядається, а також від припущень, прийнятих на етапі початку моделювання процесу евакуації.

Таким чином, проведений аналіз закордонних джерел щодо методів розрахунків тривалості евакуації з будівель та споруд та моделюванні цих процесів [8-21] свідчить про відсутність єдиного підходу до розрахунку часу початку (затримки) евакуації та впливу його значення на моделювання процесів евакуації і на індивідуальний пожежний ризик в приміщеннях і будівлях різного призначення.

Метою роботи є аналіз сучасного стану досліджень визначення часу початку евакуації, методів його розрахунку та аналіз експериментальних досліджень для виявлення і узагальнення чинників, що впливають на значення часу початку евакуації людей під час пожежі.

Методи дослідження. У роботі використані: статистичний метод і метод теоретичного узагальнення з метою виконання таких завдань:

- проаналізувати стан забезпечення пожежної безпеки об'єктів захисту;

- проаналізувати вітчизняні нормативні документи щодо визначення часу початку евакуації;
- проаналізувати закордонні джерела і рішення щодо розрахунку часу початку евакуації людей на пожежі та експериментальних досліджень процесів евакуації.

Результати роботи

Стаття 55. Кодексу цивільного захисту України декларує, що «пожежна безпека і її забезпечення є невід'ємною складовою діяльності держави щодо захисту життя та здоров'я людини, майна і навколишнього природного середовища від пожеж» [31].

В свою чергу, Правилами пожежної безпеки в Україні декларується, що пожежна безпека повинна бути забезпечена шляхом проведення організаційних заходів та технічних засобів, спрямованих на запобігання пожежам, забезпечення безпеки людей, зниження можливих майнових втрат і зменшення негативних екологічних наслідків у разі їх виникнення, створення умов для успішного гасіння пожеж (*п.4 розділ I.*)»[32], або іншими словами: «пожежна безпека об'єкта захисту забезпечується системою запобігання пожежі, комплексом протипожежного захисту та системою управління пожежною безпекою об'єкта (далі -СУПБ)» [1].

Як визначено в [1], СУПБ являє собою комплекс заходів з перевірки, аналізу і оцінки стану пожежної безпеки об'єкта захисту з метою прийняття відповідних управлінських рішень. В свою чергу, **комплекс протипожежного захисту** – ні що інше, як сукупний набір технічних засобів протипожежного захисту на об'єкті захисту, а також заходів щодо забезпечення безпечної евакуації людей, обмеження поширення пожежі, обслуговування об'єкта захисту пожежно-рятувальними підрозділами, безпеки пожежно-рятувальних підрозділів, що призначені для захисту людей, матеріальних цінностей та довкілля від впливу пожежі.

Так, основною метою СУПБ, відповідно до вимог ДСТУ 8965:2019 «Система управління пожежною безпекою об'єкта захисту» [33], є створення умов для запобігання виникненню а розвитку пожежі, впливу небезпечних чинників пожежі на людей, інших живих істот, матеріальні цінності та довкілля [33]. На рис. 2 схематично зображено основні завдання СУПБ об'єкта захисту.



Рисунок 2 – Основні завдання системи управління пожежною безпекою об'єкта захисту (п. 5.3. [33])

Як видно з рис. 2, одним із завдань, але не першочерговим, є забезпечення зниження ймовірності виникнення пожежі та підвищення ймовірності успішного евакуювання людей і матеріальних цінностей у разі виникнення пожежі на об'єкті захисту, підвищення ефективності ліквідації пожежі, або іншими словами – підвищення рівня пожежної безпеки, зокрема людей, та індивідуального пожежного ризику.

Відповідно до [1], в порядку проведення розрахунку індивідуального пожежного ризику здійснюється ґрунтовний аналіз чинників, які впливають на вибір розрахункового методу, а саме: аналіз пожежної небезпеки в частині чинників, що впливають на визначення сценарію виникнення та розвитку пожежі; аналіз об'ємно-планувальних рішень, що впливають на визначення розрахункової схеми евакуації людей; аналіз ймовірної ефективності спрацювання систем протипожежного захисту:

В додатку А ДСТУ [1] описано порядок розрахунку рівня пожежної безпеки людей та індивідуального пожежного ризику.

Так, рівень пожежної безпеки людей обчислюється за формулою :

$$P_B = 1 - R_1, \quad (2)$$

де P_B – рівень пожежної безпеки людей на об'єктах; R_1 – розрахункове значення індивідуального ризику на окрему людину в рік.

В [1] розрахункове значення індивідуального ризику R_1 розраховується за формулою:

$$R_1 = Q_{\text{п}} \cdot P_{\text{пр}} \cdot (1 - P_{\text{е}}) \cdot (1 - K_{\text{сгс}}) \cdot (1 - K_{\text{о.з}}) \cdot (1 - K_{\text{п.ф}}), \quad (3)$$

де $Q_{\text{п}}$ – частота виникнення пожежі в будівлі чи споруді; $P_{\text{пр}}$ – ймовірність перебування людей у будівлі і споруді; $P_{\text{е}}$ – ймовірність евакуації людей із будівлі чи споруди; $K_{\text{сгс}}$ – коефіцієнт ймовірної ефективності спрацювання систем протипожежного захисту; $K_{\text{о.з}}$ – коефіцієнт запровадження організаційних заходів протипожежного захисту; $K_{\text{п.ф.}}$ – коефіцієнт наявності протипожежних формувань.

Ймовірність перебування людей у будівлі і споруді визначається за формулою:

$$P_{\text{пр}} = \frac{t_{\text{функц}}}{24}, \quad (4)$$

де $t_{\text{функц}}$ – термін перебування людей у будівлі в годинах.

Слід зазначити, що досвід ведення господарської діяльності під час пандемії COVID-19 та безсумнівно широкомасштабна війна внесли трансформації і в галузь трудового права. Так, згідно з чинним законодавством, в умовах мирного часу *«нормальна тривалість робочого часу не може перевищувати 40 годин на тиждень»*. Ця норма регулює робочий час виключно персоналу, але в жодному разі не обмежує графік добової експлуатації будівель і споруд різного призначення [34].

Найбільш поверхневий аналіз графіків роботи закладів громадського харчування, торгово-розважальних центрів, со-working платформ, фудкортів та інших об'єктів багатофункціонального призначення з потенційним перебуванням великої кількості людей як у Львові, так і в інших великих містах України (крім зони безпосереднього чи близького до ведення бойових дій) показує, що середня тривалість робочого дня варіюється в діапазоні з 7:30-8:00 (відкриття об'єкта) до 21:00-22:00 (закінчення роботи) – в середньому 14 годин щоденної експлуатації будівлі без вихідних.

Таким чином, очевидно, що запропоновані в [1] числові значення показника (коефіцієнта) ймовірності перебування людей у будівлі і споруді ($P_{пр}$) є не актуальними та потребують додаткових досліджень.

Окремо слід зупинитись, на порядку визначення числового значення ймовірності евакуації людей із будівлі чи споруди P_e .

Так, ймовірність евакуації людей із будівлі чи споруди розраховується за формулою:

$$P_e = \begin{cases} 0,999 \cdot \frac{0,8 \cdot t_{\text{бл}} - t_p}{t_{\text{не}}}, & \text{якщо } t_p < 0,8 \cdot t_{\text{бл}} < t_p + t_{\text{не}} \text{ та } t_{\text{ск}} \leq 6 \text{ хв} \\ 0,999, & \text{якщо } t_p + t_{\text{не}} \leq 0,8 \cdot t_{\text{бл}} < \text{та } t_{\text{ск}} \leq 6 \text{ хв} \\ 0,000, & \text{якщо } t_p \leq 0,8 \cdot t_{\text{бл}} < \text{та } t_{\text{ск}} > 6 \text{ хв} \end{cases} \quad (5)$$

де t_p – розрахункова тривалість евакуації людей; $t_{\text{не}}$ – тривалість початку евакуації; $t_{\text{бл}}$ – тривалість блокування шляхів евакуації; $t_{\text{ск}}$ – тривалість існування скупчень людей на певній ділянці [1].

Також, відповідно до [1], визначення розрахункової тривалості евакуації людей із приміщень будівель і споруд проводять із застосуванням однієї з трьох математичних моделей, а саме:

- спрощена аналітична модель руху людського потоку;
- математична модель індивідуально-потокowego руху людей із будівлі чи споруди;
- імітаційно-стохастична модель руху людських потоків.

Як вже було зазначено в роботах [11-14, 35,36,38,39], час початку евакуації є одним із ключових компонентів розрахунку, від якого

залежить загальний час тривалості евакуації людей з будівель під час пожежі. Відповідно до [1], в Україні є чинним порядок визначення часу початку як для приміщень осередку пожежі, так і для будівель, в яких виникла пожежа, в цілому. Так, для приміщення осередку пожежі час початку евакуації $t_{\text{пе}}$ (с) розраховується за формулою:

$$t_{\text{пе}} = 5 + 0,01 \cdot F \quad (6)$$

де F – площа приміщення, м^2 .

Для будинків значення тривалості від початку евакуації $t_{\text{пе}}$ визначається з таблиці А.3 із зміною 1 [1].

Обов'язково слід зазначити, що математичний вираз, представлений формулою (6), є абсолютно некоректним оскільки одиниці вимірювання в правій частині (с) не відповідають одиницям виміру лівої частини (м^2). Очевидно, що множник – «0,01» є певним коефіцієнтом з розмірністю можливо $\text{с}/\text{м}^2$, що було скоріш за все упущено в [1].

Окрім того, не зрозуміла залежність часу початку евакуації людей з певного виду громадської будівлі лише від наявності/відсутності чи певного типу системи оповіщення та керування евакуюванням людей під час пожежі. Моделювання процесів евакуації часто використовуються в інженерному аналізі в контексті розроблення проєкту загальної концепції безпеки. Гнучкість цього типу інструменту і відносна легкість його застосування дає змогу використовувати його в ході оцінювання пожежної безпеки та аналізу різних змін стратегії забезпечення належного протипожежного захисту об'єктів.

Відповідно, опираючись на вимоги в [1], можна припустити, що моделювання процесів евакуації за таких умов відбувається некоректно з великими похибками в розрахунках та під час комп'ютерного моделювання.

На сьогодні існує понад 40 програмних продуктів для проведення експериментальних досліджень процесів евакуації. Більшість моделей є «загальними моделями», які відтворюють будь-який тип будівлі, приміщення. Окрім того, є можливість застосування «спеціальних моделей», які здатні відтворювати конкретні сценарії в специфічних умовах – пожежі в літаках, на кораблях, транспортних вузлах тощо.

Вочевидь, кожен сценарій проведення евакуації людей є унікальним. Найдетальніше перелік можливих, але типових, сценаріїв процесів евакуації викладено в [11]. Цей документ лежить в основі всіх нормативних актів щодо визначення часу як початку евакуації, так і загального часу евакуації людей на пожежі в країнах Європи, Австралії та Сполучених Штатах Америки.

В [11] зазначено, що на кількісну оцінку часу початку евакуації та власне руху сильно впливають особливості людей в конкретному середовищі і відповідно для вирішення цього аспекту було визначено набір ключових якісних ознак, а саме:

– характеристика будівлі (зокрема, тип розміщення, метод виявлення та забезпечення оповіщення, системи управління пожежною безпекою та планування будівель);

– характеристики людей (зокрема, наявна чи проектна кількість людей, їх стан пильності (неспання чи сон) та знайомство з будівлею та її системами);

– потенційна можливість контакту (піддавання впливу) людей з небезпечними факторами пожежі або контакту з полум'ям.

Так, в табл. 1 [11] подані типові поведінкові сценарії проведення евакуації для будівель різного функціонального призначення, а саме:

Таблиця 1

Проектні сценарії поведінки в будівлях різного функціонального призначення [11]

Категорія	Стан пильності людей	Ступінь ознайомленості з плануванням	Щільність людей	Корпуси /складність	Тип приміщення (як приклад)
A	Стан бадьорості	Знайомі з плануванням	Низька	Один або багато	Офісні чи промислові будівлі
B1	Стан бадьорості	Не знайомі з плануванням	Висока	Один або декілька	Магазини, ресторани, будівлі з високою прохідністю людей
B2	Стан бадьорості	Не знайомі з плануванням	Висока	Один з точкою фокусу	Театри та кінотеатри
Ci	Стан сну. Довгострокове проживання в окремих помешканнях	Знайомі з плануванням	Низька	Декілька	Житлові будівлі без консьєржів
Cii	Короткострокове проживання – наявність управляючої компанії	Знайомі з плануванням	Низька	Декілька	Службові житло, гуртожитки, апартаменти під здачу тощо
Ciii	Стан сну	Не знайомі з плануванням	Низька	Багато	Готелі, хостели
D	Медичний догляд	Не знайомі з плануванням	Низька	Багато	Інституційні заклади з постійним перебування людей (начальні заклади, медичні установи, заклади пенітенціарної служби, сиротинці, геріатричні установи
E	Транспортна інфраструктура	Не знайомі з плануванням	Висока	Багато	Будівлі залізничних, авто- вокзалів, аеропорти

Окремі характеристики будівель також важливі, зокрема просторова складність, довжина шляхів слідування, особливості наявних (потенційно наявних) людей в приміщеннях, безпосередні виходи назовні та шляхи евакуації. Це в основному впливає на час слідування, а в деяких ситуаціях і на час початку евакуації.

В [11] основні сценарії чітко класифіковані, але виділяють основні три категорії чинників, що мають критичне значення на визначення часу початку евакуації:

а) для мешканців:

- їх кількість і просторовий розподіл;
- стан пильності : бадьорий/сплячий;

– ступінь ознайомлення з внутрішнім плануванням: знайомий або незнайомий;

– фізичні можливості.

б) для окремих будівель і комплексів будівель:

– система оповіщення;

– менеджмент пожежної безпеки та навчання персоналу/мешканців;

– один або кілька корпусів і їх просторова складність.

с) для сценаріїв розвитку пожежі:

– системи протипожежного захисту доступні мешканцям;

– особливості пожежі та її розвитку.

Для кожної категорії сценаріїв, наведених

у таблиці 2, описані фактори, що впливають на поведінку мешканців та на час, необхідний для виконання різних заходів на різних етапах евакуації [21], та повинні бути враховані при проведенні експериментальних досліджень.

Разом з тим, науковці стверджують, що «загальні моделі» з [11] підходять для сценаріїв проведення евакуації в будівлях категорій А, В1, В2, Сііі та Е, в під час яких зазвичай моделюються процеси евакуації людей без сторонньої допомоги (наприклад, пасажери, відвідувачі чи глядачі реагують на тривожні сигнали і переміщуються в безпечне місце самостійно).

Однак інші сценарії евакуації ще не вивчені глибоко. До деяких із них важко застосувати поточні моделі евакуації, а для деяких може знадобитися спеціальна модель.

Проведенням аналізом чітко простежується розмежування понять офісних приміщень та комерційної нерухомості від інших видів громадських будівель і споруд, оскільки даний сегмент об'єктів захисту вирізняється своїми архітектурно-планувальними рішеннями, функціональним призначенням, тривалістю робочого дня, наявним пожежним навантаженням, а відповідно і методами та підходами до управління системою пожежної безпеки. А сценарії пожеж в будівлях категорій Сі, Сіі та D можуть і повинні враховувати допомогу персоналу під час проведення заходів із евакуації через наявність людей з обмеженими можливостями чи обмеженими в самостійному прийнятті рішення (лікарні, дитячі садки, геріатричні установи, школи, установи виконання покарань, табори тимчасового утримання військовополонених тощо).

Деякі «загальні моделі» дають змогу симулювати додаткову поведінку людей, які підлягають евакуації, що можна використати для імітації процедур евакуації за регламентом.

В одній з останніх публікацій авторів [40] описуються дослідження можливостей платформ STEPS і Pathfinder для моделювання процесів евакуації дітей по сходах. Результати показали суттєві відмінності між моделями. Ні STEPS, ні Pathfinder не змогли відтворити умов навколишнього середовища, спричиненні швидким розповсюдженням продуктів горіння і диму, хоча саме ці чинники вплинули на вибір конкретного шляху евакуації і виходу назовні під час програмного моделювання на платформі FDS+Evac.

Висновки

1. Пожежна безпека об'єктів з масовим перебуванням людей та мінімізація індивідуальних пожежних ризиків особливо в умовах воєнного стану є пріоритетним завданням напрямку запобігання виникненню надзвичайних ситуацій. Пожежна небезпека об'єктів з масовим

перебуванням залежить не лише від наявності великої кількості джерел запалювання; складності архітектурно-планувальних рішень, наявності/відсутності систем протипожежного захисту, але й більшою мірою від особистісних характеристик наявних (потенційно наявних) людей в цих будівлях.

2. Встановлено, що наукових обґрунтувань розрахунку часу початку евакуації все ще мало, хоча дані результатів експериментальних досліджень з'являються постійно. Виявлено відсутність залежностей чинників, які впливають на виявлення та усвідомлення людиною небезпеки для життя від небезпечних чинників пожежі, на час початку евакуації під час пожежі.

3. Ризики, що призводять до загибелі людей на пожежах, демонструють потребу в дослідженні, розробці і впровадженні більш ефективних форм та методів запобігання виникненню надзвичайних ситуацій. Встановлено, що розкриття особливостей впливу чинників (об'єм, пожежне навантаження, кількість та характеристика людей) на значення часу початку евакуації людей під час пожежі є важливим науковим завданням, вирішення якого є підґрунтям для удосконалення методу оцінювання рівня безпеки людей під час пожежі, яке і буде предметом подальших досліджень.

Список літератури

1. ДСТУ 8828:2019. Пожежна безпека. Загальні положення. Чинний від 2019-02-27. Вид. офіц Київ :УкрНДНЦ, 2020. 84с.

2. ЗВІТ про основні результати діяльності Державної служби України з надзвичайних ситуацій у 2019 році. Інститут державного управління і наукових досліджень ДСНС України. URL: <https://dsns.gov.ua/upload/1/1/6/7/4/3/2020-1-30-publi-cnii-zvit-za-2019-rik-ost-fin.pdf> (дата звернення: 15.01.2024).

3. Fire in Odessa 4th of December 2019 . URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/>. (in Ukrainian).

4. Замурований вихід і ручна сигналізація: шокуючі подробиці пожежі в коледжі Одеси (документ) Internet-vydannya «Apostrof». URL:<https://apostrophe.ua/ua/article/society/2020-01-17/zamurovannyiy-vyihod-i-ruchnaya-signalizatsiya-shokiruyuschie-podrobnosti-pojara-v-kolledje-odessyi-dokument/> (in Ukrainian).

5. Design and Construction of Building Exits. NATIONAL BUREAU OF STANDARDS. United States, 1935. P.77. URL: https://books.google.com.ua/books/about/Design_and_Construction_of_Building_Exit.html?id=R0RSn_W_N3IC&redir_esc=y

6. Kobes M., Helsloot I., Bauke de Vries, Jos G. Post. Building safety and human behaviour in fire: A literature review. Fire Safety Journal. Vol.45, Issue 1, 2010. P. 1-11.

<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2009.08.005>.

7. E.D. Kuligowski, R.D. Peacock, B.L. Hoskins. A Review of Building Evacuation Models. National Institute of Standards and Technology. 2nd edition. 2010. P.36.
8. Gwynne S.M.V., Rosenbaum E.R. Employing the Hydraulic Model in Assessing Emergency Movement. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering/ed. by Springer, New York, 2016. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0_59
9. Fridolf K., Nilsson D., Frantzieh H. Fire Evacuation in Underground Transportation Systems: A Review of Accidents and Empirical Research. Fire Technol. Vol. 49, 2013. P. 451–475. <https://doi.org/10.1007/s10694-011-0217-x>.
10. ISO/TR 16738:2009 Fire-safety engineering – Technical information on methods for evaluating behaviour and movement of people. Geneva, Switzerland, 2009. P.41. URL: <https://www.iso.org/eu/standard/42887.html>
11. PD7974-6:2004. The application of fire safety engineering principles to fire safety design of buildings. Part 6: Human factors: Life safety strategies – Occupant evacuation, behaviour and condition (sub.system 6). URL: <https://www.scribd.com/doc/112403091/PD-7974-6-2004>.
12. Proulx, G. Movement of people: The evacuation timing. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering/ ed.by Society of Fire Protection Engineers Bethesda, III edition, chapter 3. Maryland, 2006. P.342-366.
13. Gwynne, S., Purser, D., Boswell, D.. Pre-Warning Staff Delay: A Forgotten Component in ASET/RSET Calculations. Pedestrian and Evacuation Dynamics/ ed. by Peacock R., Kuligowski E., Averill J. Springer, Boston, 2011. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9725-8_22.
14. Purser D.A. Dependence of modelled evacuation times on key parameters and interactions. Fire Safety Science. Vol.9, 2008. P.353-364. doi:10.3801/IAFSS.FSS.9-353
15. McConnell N., Boyce K.E., Shields T., Galea E.R., Day R.C., Hulse L. The UK 9/11 evacuation study: Analysis of survivors' recognition and response phase in WTC1. Fire Safety Journal. Vol. 45, 2010. P. 21-34. doi:10.1016/j.firesaf.2009.09.001.
16. Kuligowski E., Mileti D. Modeling pre-evacuation delay by occupants in World Trade Center Towers 1 and 2 on September 11, 2001. Fire Safety Journal. Vol 44, 2009. P. 487-496. doi:10.1016/j.firesaf.2008.10.001.
17. Sherman M.F., Peyrot M., Magda L.A., Gershon R.R.M. Modeling pre-evacuation delay by evacuees in World Trade Center Towers 1 and 2 on September 11, 2001: A revisit using regression analysis. Fire Safety Journal, Vol. 46, 2011, P. 414-424, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2011.07.001>.
18. Kuligowski E. Predicting Human Behavior During Fires. Fire Technology. Vol 49, 2013. P. 110-120. <https://doi.org/10.1007/s10694-011-0245-6>.
19. Proulx G., Chantal L. Recollection, Identification and Perceived Urgency of the Temporal-Three Evacuation Signal. Journal of Fire Protection Engineering. Vol 13, 2003. P. 67-82. <https://doi.org/10.1177/1042391503013001004>.
20. Galea, E.R., Sauter M., Deere S., Filippidis, L. Investigating the Impact of Culture on Evacuation Behavior - A Turkish Data-Set. Fire Safety Science, Vol.10, 2012. P. 709-722. <https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.10-709>.
21. Nilsson D. Exit choice in fire emergencies - Influencing choice of exit with flashing lights. [Doctoral Thesis (compilation), Division of Fire Safety Engineering]. Brandteknik och riskhantering, Lund, 2009.
22. Kuligowski E. Modeling Human Behavior during Building Fires, Technical Note. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 2008. URL: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=861621 (дата звернення: 07.04.2024).
23. Bensilum M., Purser D. Grid Flow: An Object-oriented Building Evacuation Model Combining Pre-movement And Movement Behaviours For Performance-based Design. Fire Safety Science, Vol. 7, 2003. P.941-952. <https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.7-941>.
24. Thompson P.A., Marchant E.W. A computer model for the evacuation of large building populations. Fire Safety Journal, Vol.24, Issue 2, 1994. P.131-148. [https://doi.org/10.1016/0379-7112\(95\)00019-p](https://doi.org/10.1016/0379-7112(95)00019-p).
25. Verification and validation—Pathfinder 2013.1. Thunderhead Engineering, 2014.
26. Korhonen T., Hostikka S. Fire Dynamics Simulator with Evacuation FDS+Evac, version 5. Technical Reference and User's Guide.2010.
27. Gwynne S., Galea E., Lawrence P., Filippidis L. Modelling occupant interaction with fire conditions using the buildingEXODUS evacuation model. Fire Safety Journal, Vol 36, Issue 4, 2001. P. 327–357. [https://doi.org/10.1016/S0379-7112\(00\)00060-6](https://doi.org/10.1016/S0379-7112(00)00060-6)
28. Simulation of transient evacuation and pedestrian. Mott MacDonald Simulation Group. 2012. URL: <https://www.steps.mottmac.com/steps-dynamics>. (дата звернення: 16.04.2024).
29. Purser D.A., Bensilum M. Quantification of behaviour for engineering design standards and escape time calculations. Safety Science, Vol. 38, Issue 2, 2001. P. 157-182. [https://doi.org/10.1016/S0925-7535\(00\)00066-7](https://doi.org/10.1016/S0925-7535(00)00066-7).
30. Fahy R. F. New developments in EXIT89. National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, 2000.
31. Кодекс цивільного захисту України: Закон України від 02 жовтня 2012 року № 5403-VI : станом на 19 квітня 2024р. URL:

<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text>
(дата звернення: 24.04.2024).

32. Про затвердження Правил пожежної безпеки в Україні: Наказ МВС України від 30.12.2014 року №1417: станом на 07 квітня 2024р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0252-15#Text> (дата звернення: 19.04.2024).

33. ДСТУ 8965:2019. Система управління пожежної безпекою об'єкта захисту. Чинний від 2019-12-24. Вид. офіс Київ :УкрНДНЦ, 2020. 15с.

34. Про організацію трудових відносин в умовах воєнного стану: Закон України від 15 березня 2022 року № 2136-IX: станом на 24 грудня 2023 року. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2136-20#Text> (дата звернення: 19.04.2024).

35. Fire Safety Engineering in Buildings, Part 1: Guide to the Application of Fire Safety Engineering Principles/ ed.by British Standard Institutue, DD240, London, 1997.

36. Оношко І., Ковалишин В. Аналіз методології оцінювання пожежних ризиків. Пожежна безпека. Вип. 41, 2022. С. 94–102. DOI: doi.org/10.32447/20786662.41.2022.11.

37. SFPE Guide to Fire Risk Assessment. Ed. by Society of Fire Protection Engineers. Gaithersburg, USA, 2023. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-17700-2>.

38. Хлевной О. В., Харишин Д. В., Назаровець О. Б. Проблемні питання розрахунку часу евакуації при пожежах у закладах дошкільної та середньої освіти з інклюзивними групами. Пожежна безпека. Вип. 37, 2020. С. 72–76.

39. Шахов С. М., Виноградов С. А., Рибка Є.О., Гарбуз С. В., Остапов К. М. Особливості визначення часу евакуації людей з будівель при пожежі. Проблеми надзвичайних ситуацій. Вип. 2(38), 2023. с.53-68.
<http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/19620>

40. M.C. Campanella, A.R. Larusdottir, W. Daamen, and A.S. Dederichs. Empirical data analysis and modelling of the evacuation of children from three multi-storey day-care centres. Proceedings of Evacuation and Human Behavior in Emergency Situations, Santander, 2011.

References

1. Pozhezhna bezpeka. Zahal'ni polozhennya [Fire Security. Terms]. Natsional'nyy standart Ukrayiny (vydannya ofitsiyne). DSTU 8828:2019.DP «UkrNDNTS». (in Ukrainian).

2. ZVIT pro osnovni rezul'taty diyal'nosti Derzhavnoyi sluzhby Ukrayiny z nadzvychaynykh sytuatsiy u 2019 rotsi [REPORT on the main results of the State Emergency Service of Ukraine in 2019]. IDUNDTSZ, 2021.URL: <https://dsns.gov.ua/upload/1/1/6/7/4/3/2020-1-30-publicnii-zvit-za-2019-rik-ost-fin.pdf> (in Ukrainian).

3. Fire in Odessa 4th of December 2019 . URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/>. (in Ukrainian)

4. Zamurovanyy vykhid i ruchna syhnalizatsiya: shokuyuchi podrobytsi pozhezhi v koledzhi Odesy (dokument) [Walled exit and manual alarm: shocking details of the fire at Odessa College]. Internet-vydannya «Apostrof». URL: <https://apostrophe.ua/ua/article/society/2020-01-17/zamurovannyiy-vyihod-i-ruchnaya-signalizatsiya-shokiruyuschie-podrobnosti-pojara-v-kolledje-odessyi-dokument/> (in Ukrainian).

5. Design and Construction of Building Exits. NATIONAL BUREAU OF STANDARDS. United States, 1935. P.77. URL: https://books.google.com.ua/books/about/Design_and_Construction_of_Building_Exit.html?id=R0RSn_W_N3IC&redir_esc=y

6. Kobes M., Helsloot I., Bauke de Vries, Jos G. Post. Building safety and human behaviour in fire: A literature review. Fire Safety Journal. Vol.45, Issue 1, 2010. P. 1-11.
<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2009.08.005>.

7. E.D. Kuligowski, R.D. Peacock, B.L. Hoskins. A Review of Building Evacuation Models. National Institute of Standards and Technology. 2nd edition. 2010. P.36.

8. Gwynne S.M.V., Rosenbaum E.R. Employing the Hydraulic Model in Assessing Emergency Movement. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering/ed. by Springer, New York, 2016. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0_59

9. Fridolf K., Nilsson D., Frantzich H. Fire Evacuation in Underground Transportation Systems: A Review of Accidents and Empirical Research. Fire Technol. Vol. 49, 2013. P. 451–475. <https://doi.org/10.1007/s10694-011-0217-x>.

10. ISO/TR 16738:2009 Fire-safety engineering – Technical information on methods for evaluating behaviour and movement of people. Geneva, Switzerland, 2009. P.41. URL: <https://www.iso.org/eu/standard/42887.html>

11. PD7974-6:2004. The application of fire safety engineering principles to fire safety design of buildings. Part 6: Human factors: Life safety strategies—Occupant evacuation, behaviour and condition (sub.system 6). URL: <https://www.scribd.com/doc/112403091/PD-7974-6-2004>.

12. Proulx, G. Movement of people: The evacuation timing. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering/ ed.by Society of Fire Protection Engineers Bethesda, III edition, chapter 3. Maryland, 2006. P.342-366.

13. Gwynne, S., Purser, D., Boswell, D.. Pre-Warning Staff Delay: A Forgotten Component in ASET/RSET Calculations. Pedestrian and Evacuation Dynamics/ ed. by Peacock R., Kuligowski E., Averill J. Springer, Boston, 2011. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9725-8_22.

14. Purser D.A. Dependence of modelled evacuation times on key parameters and interactions.

Fire Safety Science. Vol.9, 2008. P.353-364. doi:10.3801/IAFSS.FSS.9-353

15. McConnell N., Boyce K.E., Shields T., Galea E.R., Day R.C., Hulse L. The UK 9/11 evacuation study: Analysis of survivors' recognition and response phase in WTC1. Fire Safety Journal. Vol. 45, 2010. P. 21-34. doi:10.1016/j.firesaf.2009.09.001.

16. Kuligowski E., Mileti D. Modeling pre-evacuation delay by occupants in World Trade Center Towers 1 and 2 on September 11, 2001. Fire Safety Journal. Vol 44, 2009. P. 487-496. doi:10.1016/j.firesaf.2008.10.001.

17. Sherman M.F., Peyrot M., Magda L.A., Gershon R.R.M. Modeling pre-evacuation delay by evacuees in World Trade Center Towers 1 and 2 on September 11, 2001: A revisit using regression analysis. Fire Safety Journal, Vol. 46, 2011, P. 414-424, https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2011.07.001.

18. Kuligowski E. Predicting Human Behavior During Fires. Fire Technology. Vol 49, 2013. P. 110-120. https://doi:10.1007/s10694-011-0245-6.

19. Proulx G., Chantal L. Recollection, Identification and Perceived Urgency of the Temporal-Three Evacuation Signal. Journal of Fire Protection Engineering. Vol 13, 2003. P. 67-82. https://doi:10.1177/1042391503013001004.

20. Galea, E.R., Sauter M., Deere S., Filippidis, L. Investigating the Impact of Culture on Evacuation Behavior - A Turkish Data-Set. Fire Safety Science, Vol.10, 2012. P. 709-722. https://doi:10.3801/IAFSS.FSS.10-709.

21. Nilsson D. Exit choice in fire emergencies - Influencing choice of exit with flashing lights. [Doctoral Thesis (compilation), Division of Fire Safety Engineering]. Brandteknik och riskhantering, Lund, 2009.

22. Kuligowski E. Modeling Human Behavior during Building Fires, Technical Note. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 2008. URL: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=861621 (дата звернення: 07.04.2024).

23. Bensilum M., Purser D. Grid Flow: An Object-oriented Building Evacuation Model Combining Pre-movement And Movement Behaviours For Performance-based Design. Fire Safety Science, Vol. 7, 2003. P.941-952. https://doi:10.3801/IAFSS.FSS.7-941.

24. Thompson P.A., Marchant E.W. A computer model for the evacuation of large building populations. Fire Safety Journal, Vol.24, Issue 2, 1994. P.131-148. https://doi:10.1016/0379-7112(95)00019-p.

25. Verification and validation—Pathfinder 2013.1. Thunderhead Engineering, 2014.

26. Korhonen T., Hostikka S. Fire Dynamics Simulator with Evacuation FDS+Evac, version 5. Technical Reference and User's Guide.2010.

27. Gwynne S., Galea E., Lawrence P., Filippidis L. Modelling occupant interaction with fire conditions using the buildingEXODUS evacuation model. Fire Safety Journal, Vol 36, Issue 4, 2001. P. 327–357. https://doi:10.1016/s0379-7112(00)00060-6.

28. Simulation of transient evacuation and pedestrian. Mott MacDonald Simulation Group. 2012. URL: https://www.steps.mottmac.com/steps-dynamics. (дата звернення: 16.04.2024).

29. Purser D.A, Bensilum M. Quantification of behaviour for engineering design standards and escape time calculations. Safety Science, Vol. 38, Issue 2, 2001. P. 157-182. https://doi:10.1016/S0925-7535(00)00066-7.

30. Fahy R. F. New developments in EXIT89. National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, 2000.

31. Kodeks tsyvil'noho zakhystu Ukrayiny: Zakon Ukrayiny vid 02 zhovtnya 2012 roku № 5403-VI [Code of Civil Protection of Ukraine]. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text (in Ukrainian).

32. Pro zatverdzhennya Pravyl pozhezhnoyi bezpeky v Ukrayini: Nakaz MVS Ukrayiny vid 30.12.2014 roku №1417 [The approval of the Fire Safety Rules in Ukraine]. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0252-15#Text (in Ukrainian).

33. Systema upravlinnya pozhezhnoyi bezpekoyu ob'yekta zakhystu. DSTU 8965:2019. Chynnyy vid 2019-12-24 [The fire safety management system of the protection facility]. Vyd. ofits Kyiv: UkrNDNTS, 2020.

34. Pro orhanizatsiyu trudovykh vidnosyn v umovakh voyennoho stanu: Zakon Ukrayiny vid 15 bereznia 2022 roku № 2136-IX [On the organization of labor relations under martial law]. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2136-20#Text (in Ukrainian).

35. Fire Safety Engineering in Buildings, Part 1: Guide to the Application of Fire Safety Engineering Principles/ ed.by British Standard Institutue, DD240, London, 1997.

36. Onoshko I., Kovalyshyn V. Analiz metodolohiyi otsinyuvannya pozhezhnykh ryzykiv [Analysis of fire risk assessment methodology]. Pozhezhna bezpeka. Vol. 41, 2022. P. 94–102. DOI: doi.org/10.32447/20786662.41.2022.11.

37. SFPE Guide to Fire Risk Assessment. Ed. by Society of Fire Protection Engineers. Gaithersburg, USA, 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-17700-2.

38. Khlevnoy O. V., Kharyshyn D. V., Nazarovets' O. B. Problemni pytannya rozrakhunku chasu evakuatsiyi pry pozhezhakh u zakladakh doshkil'noyi ta seredn'oyi osvity z inklyuzyvnymy hrupamy [Problematic issues of calculating evacuation time in case of fires in preschool and secondary

education institutions with inclusive groups]. Pozhezhna bezpeka. Vol. 37, 2020. P. 72–76.

39. Shakhov S. M., Vynohradov S. A., Rybka YE. O., Harbuz C. V., Ostapov K. M. Osoblyvosti vyznachennya chasu evakuatsiyi lyudey z budivel' pry pozhezhi [Peculiarities of determining the time of evacuation of people from buildings in case of fire]. Problemy nadzvychnykh sytuatsiy. Vol. 2(38),

2023. P.53-68. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/19620/>

40. Campanella M.C., Larusdottir A.R., Daamen W., and A.S. Dederichs. Empirical data analysis and modelling of the evacuation of children from three multi-storey day-care centres. Proceedings of Evacuation and Human Behavior in Emergency Situations, Santander, 2011.

© I. А. Оношко, В. В. Ніжник,
О. М. Чекригін, Т. М. Шналь, 2024.

Оглядова стаття.

Надійшла до редакції 07.05.2024.

Прийнято до публікації 12.06.2024.



А. А. Ренкас, В. І. Товарианський

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5518-3508> – А. А. Ренкас

<https://orcid.org/0000-0002-4484-8164> – В. І. Товарианський



arthur.rencas@gmail.com

АСПЕКТИ ПРИКОРДОННОЇ ВЗАЄМОДІЇ ПОЖЕЖНО-РЯТУВАЛЬНИХ ПІДРОЗДІЛІВ УКРАЇНИ ТА КРАЇН ЄВРОПЕЙСЬКОГО СОЮЗУ ПІД ЧАС ЛІКВІДАЦІЇ ПОЖЕЖ В ПРИРОДНИХ ЕКОСИСТЕМАХ

Постановка проблеми. Пожежі в природних екосистемах призводять до серйозних наслідків: втрати біорізноманіття, руйнування літосфери, згубного впливу на клімат, шкоди для життя та здоров'я живих організмів, а також до значних економічних втрат. Навіть при врахуванні заходів із запобігання природним пожежам, іноді виникають обставини, які роблять ці заходи неефективними. Тому актуальним на сьогодні напрямом із запобігання розповсюдженню таких пожеж є своєчасне виявлення їх осередків та зменшення тривалості реагування на них шляхом оптимального розміщення та взаємодії пожежно-рятувальних підрозділів.

Мета роботи – дослідити можливості взаємодії пожежно-рятувальних підрозділів в межах прикордонних територій України та Польщі шляхом їх оптимального розміщення.

Опис матеріалу. У роботі проаналізовано особливості розміщення державних та добровільних пожежно-рятувальних підрозділів Республіки Польща та України вздовж кордону між частиною Львівської області та частинами територій Підкарпатського і Люблінського воєводств. Досліджено віддаленості територій від місць розташування пожежно-рятувальних підрозділів шляхом розбиття площини на зони обслуговування із застосуванням діаграм Вороного. Описано перспективи залучення пожежно-рятувальних підрозділів України та Польщі з огляду на механізм залучення іноземних сил цивільного захисту.

Результати. Обґрунтовано, що для взаємодії під час гасіння пожеж в природних екосистемах на прикордонній території України та Польщі доцільно задіювати пожежно-рятувальні підрозділи, які розташовані в першій та другій лініях поблизу кордону Яворівського, Львівського, Самбірського та Сокальського районів Львівської області, а також Хелмського, Грубешовського та Томашувського повітів Люблінського воєводства, Бещадського, Пшемиського, Ярославського та Любашувського повітів Підкарпатського воєводства. Шляхом графічного представлення розбиття площини на області за допомогою точок Вороного досліджено, що підрозділ м. Рава-Руська спроможний взаємодіяти з підрозділом Томашувського повіту; села Медика – Мостиського району; м. Перемишля – м. Добромиля. Встановлено, що вдосконалювати ефективність взаємодії пожежно-рятувальних підрозділів України та Польщі у сфері ліквідації пожеж в природних екосистемах можна шляхом укладання угод про спільне реагування на такі пожежі між прикордонними територіальними громадами.

Ключові слова: пожежно-рятувальний підрозділ, пожежі в природних екосистемах, діаграми Вороного оптимальне розміщення, залучення, взаємодія.

А. А. Renkas, V. I. Tovarianskyi

Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine

ASPECTS OF BORDER INTERACTION BETWEEN FIRE AND RESCUE DEPARTMENTS OF UKRAINE AND THE EUROPEAN UNION COUNTRIES IN THE FIELD OF FIRES ELIMINATION IN NATURAL ECOSYSTEMS

Formulation of the problem. Fires in natural ecosystems lead to serious consequences: loss of biodiversity, destruction of the lithosphere, detrimental effects on the climate, harm to the life and health of living organisms, as well as significant economic losses. Even when taking into account measures to prevent wildfires, circumstances may sometimes arise that make these measures ineffective. Therefore, the current direction today for preventing the spread of such fires is the timely identification of their sources and reducing the duration of response to them through the optimal placement and interaction of fire and rescue units.

The purpose of the work is to explore the possibilities of interaction between fire and rescue units within the border areas of Ukraine and Poland through their optimal placement.

Description of the material. The work analyses the features of the deployment of state and voluntary fire and rescue units of the Republic of Poland and Ukraine along the border between part of the Lviv region and parts of the territories of the Podkarpackie and Lublin voivodeships. The distances of territories from the locations of fire and rescue units were studied by dividing the plane into service areas using Voronoi diagrams. The prospects for attracting fire and rescue units of Ukraine and Poland are described, taking into account the mechanism for attracting foreign civil protection forces.

Results. It has been substantiated that to interact when extinguishing fires in natural ecosystems on the border territory of Ukraine and Poland, it is advisable to use fire and rescue units located in the first and second lines near the border of Yavorivsky, Lvivsky, Samborsky and Sokalsky districts of the Lviv region, as well as Chelmsky, Grubeshovsky and Tomashevsky counties of the Lublin Voivodeship, Bieszczady, Przemilski, Yaroslav and Lubaszowski counties of the Subcarpathian Voivodeship. By graphically representing the division of planes into regions using Voronoi points, it was discovered that the subdivision of the city of Ravi-Russkaya is capable of interacting with the subdivision of Tomashevsky district; in the village Medica – Mostissky district; to the city of Przemysl - from the city of Dobromil. It has been established that improving the efficiency of interaction between fire and rescue units of Ukraine and Poland in the field of eliminating fires in natural ecosystems can be achieved by concluding agreements on a joint response to such fires between border territorial communities.

Keywords: fire and rescue unit, fires in natural ecosystems, Voronoi diagrams, optimal placement, attraction, interaction.

Вступ. Щороку в Україні виникає понад 500 пожеж в природних екосистемах: в лісових масивах, зонах лісостепу та степу, на торфовищах тощо, що становить близько 1 % від загальної кількості пожеж. Такі пожежі поширюються на великі площі, характеризуються тривалістю гасіння та необхідністю залучення значної кількості особового складу і техніки, а що найгірше – завдають масштабних збитків. Тому поряд з питанням своєчасного виявлення та запобігання пожежам в природних екосистемах стоїть застосування дій та заходів щодо їх ефективної локалізації.

Найбільш розповсюдженим методом локалізації пожеж в лісах є створення протипожежних розривів і бар'єрів, а також облаштування та поновлення мінералізованих смуг. Проте, як свідчить практика, ці заходи є малоефективними. Тому пріоритетним на сьогодні напрямом боротьби із розповсюдженням лісових пожеж є своєчасне виявлення їх осередків та зменшення тривалості реагування на них шляхом оптимального розміщення та взаємодії підрозділів пожежної охорони (державної, відомчої, місцевої та добровільної).

Мета роботи – дослідити можливості взаємодії пожежно-рятувальних підрозділів в межах прикордонних територій України та Польщі шляхом їх оптимального розміщення.

Виклад матеріалу. У 2022 році зросла кількість пожеж у лісах у 2,3 раза в порівняно з 2021 роком, при цьому площа таких пожеж збільшилась аж у 77 разів [1]. Зокрема, пожежі на території Дунайського біосферного заповідника, які виникали у 2022 році, призвели до прямих матеріальних збитків на суму 4 млн 412 тис. 672 грн, а побічних – 5 млн 354 тис. 262 грн [2]. Загалом через природні пожежі у 2022 році Україна втратила в 30 разів більше лісів, ніж у попередні періоди [3]. До погіршення стану пожежної безпеки в

екосистемах, особливо в 2022–2023 роках, призвела повномасштабна війна, оскільки в цей період понад 59 тис га лісів та інших насаджень знищено та випалено ракетами і снарядами, а їх відновлення триватиме протягом кількох десятиріч років [4].

Координація діяльності з питань запобігання та локалізації пожеж в природних екосистемах насамперед регулюється законодавчою базою, зокрема керівними документами, які регламентують гасіння пожеж в природних екосистемах [5, 6]. Крім цього, невід'ємною складовою є проведення наукових досліджень в цій області. Так, в роботі [7] автор досліджує чинники впливу на локалізацію лісової пожежі, а група науковців в роботі [8] дослідила можливості використання пристосованої техніки для локалізації та ліквідації лісових пожеж в Україні. Разом з цим досліджувались методи оптимізації просторового розміщення пожежних підрозділів з урахуванням функціональних зон населених пунктів [9], особливості розташування моніторингових протипожежних зон в лісах [10], а також методи оптимального розміщення зон дислокації протипожежної техніки та обладнання [11, 12]. Проте, недостатньо дослідженням залишається застосування запропонованих вище методів у практичній діяльності, зокрема в контексті обґрунтування ефективності дій з реагування на пожежі в природних екосистемах, яка, як відомо, досягається:

- налагодженою взаємодією пожежно-рятувальних підрозділів з підрозділами лісового господарства;
- скороченням часу виявлення пожежі та шляхів введення сил та засобів;
- наявністю лісових пожежних станцій;
- вивченням характеристик лісових насаджень;
- наявністю пристосованої протипожежної техніки та обладнання та ін.

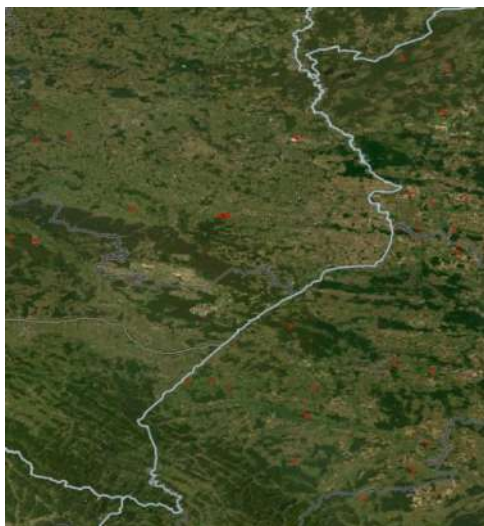
Ці аспекти важливо досліджувати комплексно,

з огляду на організаційні, технічні та тактичні можливості міждержавної співпраці з країнами Європейського союзу, зокрема з Республікою Польща.

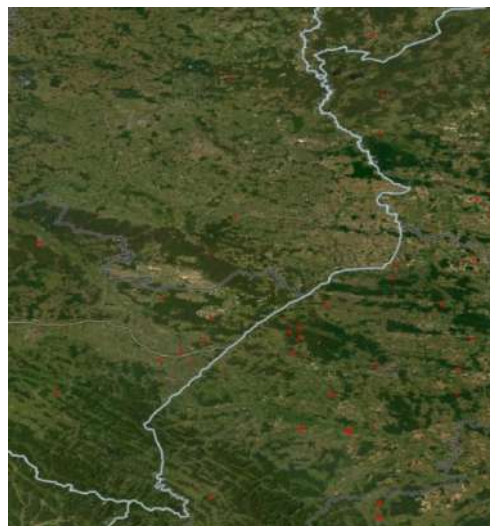
Вздовж кордону України та Польщі розташовані ліси Малого Полісся (протяжністю близько 85 км), ліси Волинського Полісся (протяжністю 80 км) та ліси Східних Бескидів Карпатських гір (протяжністю 70 км). Таким чином,

вздовж кордону з Польщею простягається лісиста місцевість, що становить близько 44 % від загальної довжини кордону.

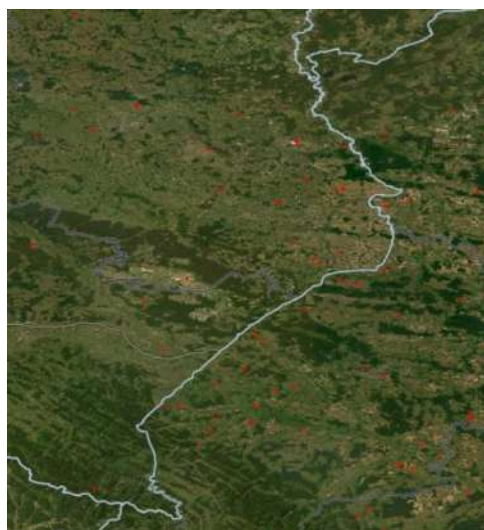
Досліджуючи пожежонебезпечні періоди 2022 року, зазначимо, що найчастіше виникали природні пожежі вздовж кордону між Україною та Польщею в квітні – травні та серпні – вересні [13] (рис. 1).



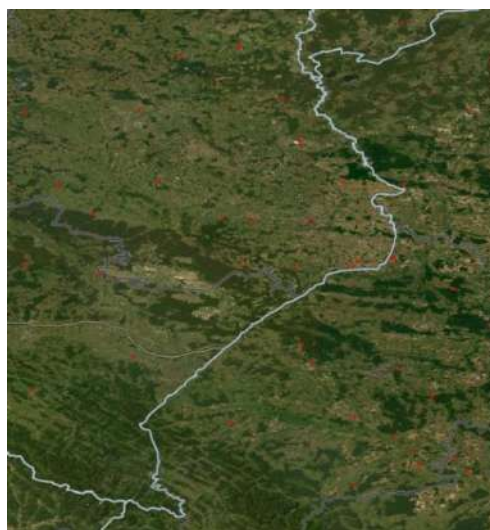
а)



б)



в)



г)

Рисунок 1 – Пожежі, що виникали в природних екосистемах у 2022 році вздовж кордону між Україною та Польщею: а) квітень; б) травень; в) серпень; г) вересень [13]

Під час досліджень встановлено, які пожежно-рятувальні підрозділи України [14] можуть бути задіяні для гасіння пожеж на території Польщі. Також запропоновано пожежно-рятувальні підрозділи Польщі [15], які могли б бути залучені до гасіння пожеж на території України. Для цього обрано ділянку кордону, яка охоплює частину Львівської області України та частину Підкарпатського і

Люблінського воєводств. При цьому з добровільних пожежних частин Польщі вибрано лише ті, які включені до національної системи пожежно-рятувального забезпечення. На карту нанесено державні та добровільні пожежно-рятувальні підрозділи (виділено жовтим кольором), а підрозділи, що розташовані найближче до лінії кордону – додатково виділено червоним кольором (рис. 2).

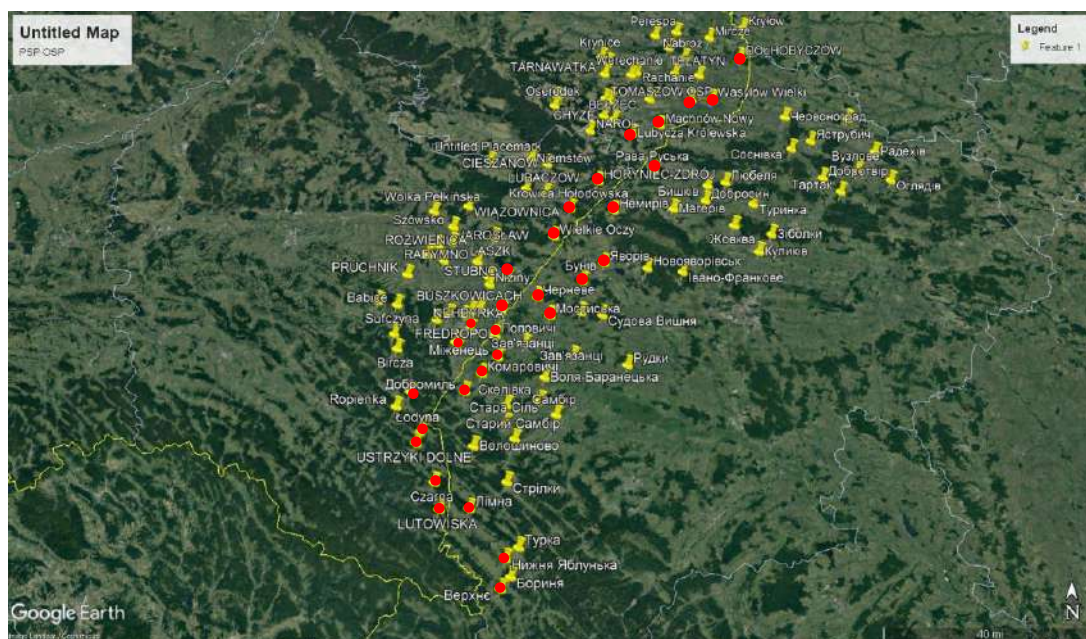


Рисунок 2 – Дислокація пожежно-рятувальних підрозділів вздовж ділянки кордону між Україною та Польщею

Для взаємодії під час гасіння пожеж в природних екосистемах на прикордонній території України та Польщі доцільно задіювати пожежні частини, які розташовані в першій та другій лініях поблизу кордону Яворівського, Львівського, Самбірського та Сокальського районів Львівської області, а також Хелмського, Грубешувського та Томашувського повітів Люблінського воєводства, Бешадського, Пшемисьльського, Ярославського та Любашувського повітів Підкарпатського воєводства.

Далі досліджено віддаленості територій від місць розташування пожежних підрозділів шляхом розбиття площини на зони обслуговування із застосуванням діаграм Вороного [16]. З цією

метою обрано три ділянки поблизу державного кордону. Перший міжнародний пункт пропуску через Рава-Руська – Гребенне. Вершинами діаграми є місця розташування пожежних підрозділів. Вузлами ребер комірок є точки, що рівновіддалені від 3-ох або більше пожежно-рятувальних підрозділів. Границями на діаграмі Вороного є всі точки на площині, які рівновіддалені від двох найближчих вершин. Як бачимо для цієї зони відстань між пожежно-рятувальними підрозділами становить близько 13 км (м. Рава-Руська–с.Потоки). Як бачимо, підрозділ, що розташований в Раві-Руській, міг би перекрити частину Томашувського повіту (рис. 3).



Рисунок 3 – Ділянка кордону із зображенням пожежно-рятувальних підрозділів поблизу пункту пропуску м. Рава-Руська — с. Гребенне

Другий пункт пропуску – Шегині–Медика. Відстань між пожежно-рятувальними підрозділами становить 19 км. Тут навпаки: бачимо, що підрозділ, який розташований в с. Медика міг би перекрити частину територіальної громади Мостиського району (рис. 4). Третя ділянка – дорога, яка сполучає м. Доброміль та м. Перемишль. На цій ділянці спостерігаємо аналогічну ситуацію. Найменша відстань між пожежно-рятувальними підрозділами

м. Доброміль та м. Перемишль становить близько 24 км. Проте пункту пропуску тут немає. Відповідно взаємодія підрозділів для надання допомоги один-одному на цій ділянці на сьогодні день налагоджена. Вирішенням цієї проблеми може бути встановлення спеціального контрольно-пропускного пункту, який би забезпечував взаємодію сил цивільного захисту України та Польщі в надзвичайних ситуаціях.

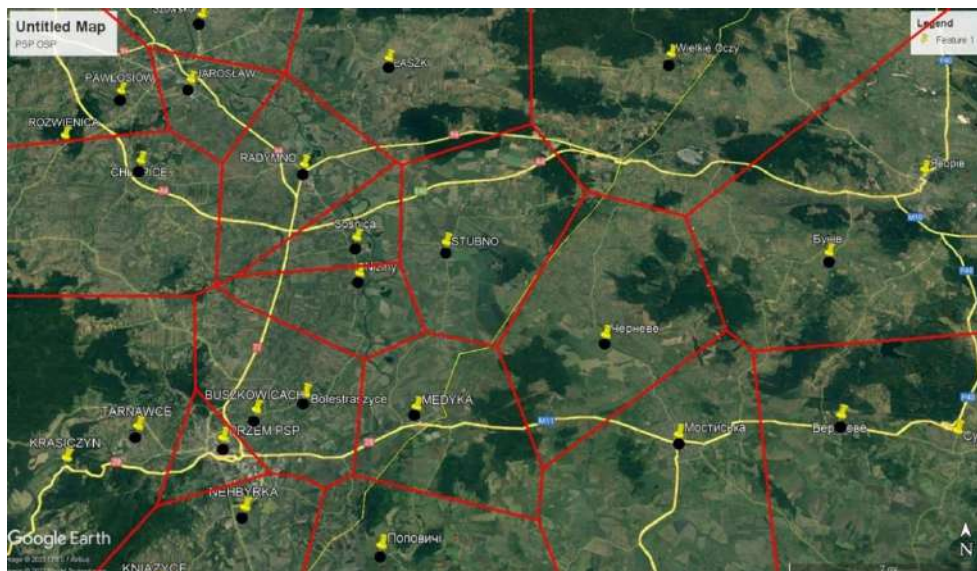


Рисунок 4 – Ділянка кордону із зображенням пожежно-рятувальних підрозділів поблизу пункту пропуску с. Шегині — с. Медика

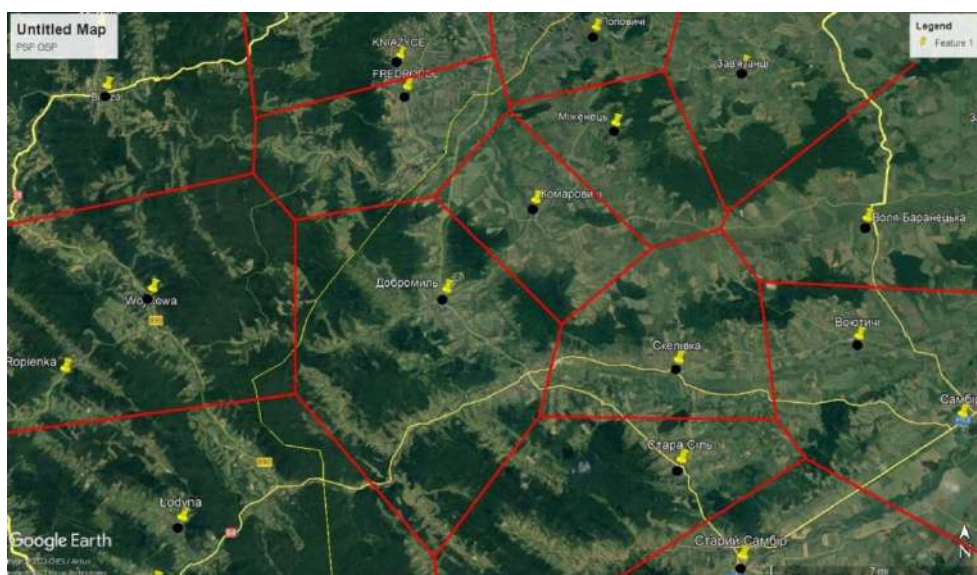


Рисунок 5 – Ділянка кордону із зображенням пожежно-рятувальних підрозділів поблизу пункту пропуску с. Нижанковичі — с. Мальховіце

Аналогічні діаграми можна побудувати і для інших ділянок кордону.

Зазначимо, що донедавна процес залучення іноземних держав для ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій на території України був досить складним [17]. Пояснюємо це тим, що

залучення іноземних підрозділів пожежно-рятувальних служб здійснюється через Організацію Об'єднаних Націй (ООН), а саме через The United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (ОСНА). Такий процес є досить тривалим, оскільки звертатись до цього

органу повинен уряд України. Після надходження звернення ОСНА створює комісію, до якої входять експерти The United Nations Disaster Assessment and Coordination (UNDAC). Після отримання висновку експертів з урахуванням потреб залучення додаткових сил та ресурсів від Національного штабу з ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій (НС) видається указ

Президента чи постанова Уряду про скерування запиту щодо залучення міжнародних рятувальних сил. Далі створюється Польовий координаційний центр, відбувається реєстрація команд, які бажають надати допомогу Україні, координація дій цих команд та інше. Структурно-логічна схема механізму залучення іноземних сил цивільного захисту зображена на рис. 6.

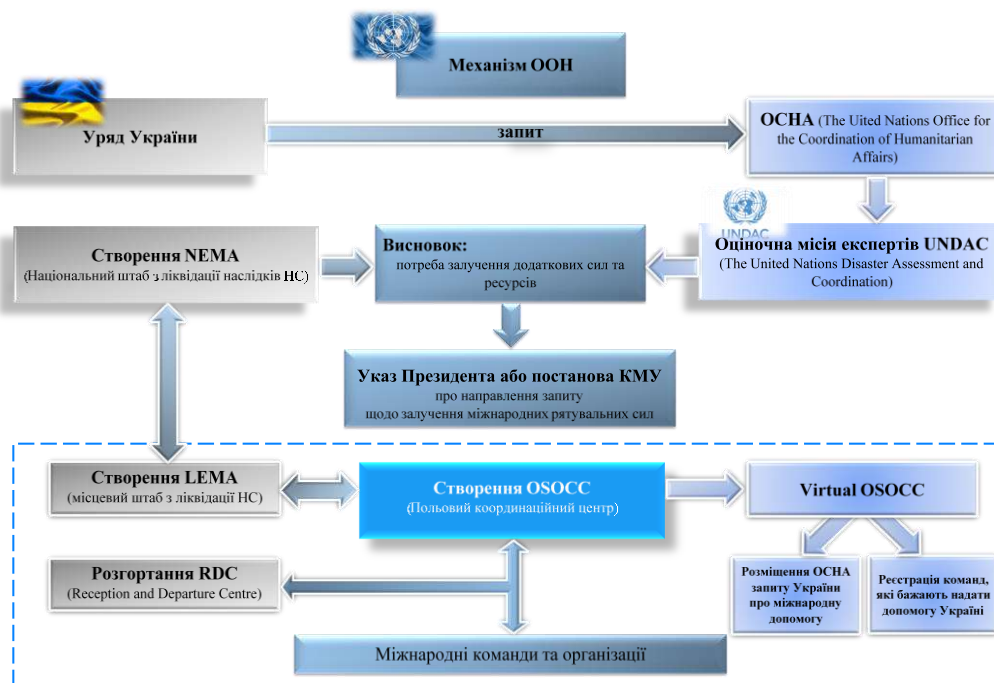


Рисунок 6 – Механізм залучення іноземних сил цивільного захисту [17]

Зрозуміло, що цей процес може зайняти період від декількох днів до тижня часу, а у випадку виникнення й поширення пожеж в природних екосистемах – це занадто довго.

На сьогодні Україна є членом Механізму цивільного захисту (UCPM) Європейського Союзу (ЄС), підписання угоди щодо членства в якому відбулось у квітні 2023 року. Незважаючи на те, що механізм цивільного захисту ЄС створений переважно для внутрішніх потреб ЄС, UCPM може бути задіяний для надання допомоги й іншим країнам.

UCPM спрямований не лише на реагування, але й на запобігання НС та підготовку країн-учасниць до реагування на них. Ця підготовка включає проведення відповідного теоретичного навчання особового складу, який може бути задіяний до подолання наслідків НС, відпрацювання практичних вправ з подолання наслідків НС різноманітного характеру, обміну експертами з різних напрямків для відпрацювання міжвідомчої взаємодії та розроблення планів реагування на випадок НС, навчання особового складу правильному застосуванню та використанню відповідних технічних засобів тощо.

Варто зазначити, що Україна разом із сусідніми країнами-учасниками систем UCPM уже реалізувала ряд спільних проєктів. Ці проєкти спрямовані на покращення заходів щодо запобігання та забезпечення готовності до реагування на техногенні та природні НС, що одночасно уражають країни-сусіди, шляхом проведення низки навчань для зміцнення національного потенціалу кожної країни та покращення взаємодії у разі залучення UCPM. Спільні навчання показали, що українські та польські пожежно-рятувальні підрозділи злагоджено працюють під час ліквідації пожеж та НС іншого характеру.

Висновки

1. Обґрунтовано, що ефективність дій з реагування на пожежі в природних екосистемах у прикордонній зоні між Україною та Польщею може бути досягнуто шляхом взаємодії через пункти пропуску.

2. 3 метою забезпечення ефективності сумісних дій на початковому етапі доцільним вважаємо запропонувати заходи, які спрямовані на укладання угод про спільне реагування на пожежі у природних екосистемах між прикордонними

територіальними громадами. Прикладом цьому може бути міжнародний пункт пропуску через м. Рава-Руська – с. Гребенне, де відстань між пожежно-рятувальними підрозділами становить близько 13 км.

3. Згідно з дослідженням, пропонуємо послідовність рішень щодо взаємодії між Україною та Польщею. На районному рівні – це повинна бути угода між Львівським районом та Томашувським повітом, а на обласному – між Львівською областю та Підкарпатським воєводством. Оскільки використана методика накладання діаграм Вороного описує зони близькості по прямій, а через кордон доведеться прямувати виключно через пункти пропуску, цю особливість потрібно враховувати в процесі розрахунку найближчого пожежно-рятувального підрозділу з кожного боку кордону. При цьому також слід звернути увагу на можливість надання безперешкодного перетину кордону українськими підрозділами для реагування на пожежі в природних екосистемах.

Список літератури

1. Державне агентство лісових ресурсів України. URL: <https://forest.gov.ua/agentstvo/polozhennya-pro-derzhlisagentstvo> (дата звернення 15.12.2023).

2. Аналітична довідка про пожежі та їх наслідки в Україні за 12 місяців 2022 року. URL: <https://idundcz.dsns.gov.ua/upload/1/6/0/8/6/7/7/analichna-dovidka-pro-pojehi-122022.pdf> (дата звернення 15.12.2023).

3. Через пожежі у 2022 році Україна вже втратила в 30 разів більше лісів, ніж у попередні періоди. URL: <https://rubryka.com/2022/11/03/cherez-pozhezhi-u-2022-rotsi-ukrayina-vzhe-vtratyla-v-30-raziv-bilshe-lisiv-nizh-u-poperedni-periody-wwf-ukrayina/> (дата звернення 17.12.2023).

4. Кузик А. Д., Товарянський В. І. Вплив воєнних дій на лісові екосистеми України та їх післявоєнне відновлення. «Вісник ЛДУ БЖД», №27, 2023. 16–22. DOI:10.32447/20784643.27.2023.02.

5. Про затвердження Правил пожежної безпеки в лісах України: наказ Державного комітету лісового господарства України від 27.12.2004 року №278. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0328-05#Text> (дата звернення: 11.01.2024).

6. Статут дій органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту під час гасіння пожеж: наказ МВС України від 26.04.2018 року №340. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0802-18#Text> (дата звернення: 11.01.2024).

7. Гуліда Е. М. Визначення локалізаційної границі та чинників локалізації лісової пожежі. «Пожежна безпека», №30, 2017. С. 77–82.

8. Попович В. В., Ренкас А. Г., Руденко Д. В. Аналіз пристосованої техніки для гасіння лісових пожеж. «Пожежна безпека», №18, 2011. С. 139–144.

9. Chen Y. et al. Spatial Location Optimization of Fire Stations with Traffic Status and Urban Functional Areas. *Appl. Spatial Analysis*, Num. 16, 2023. Pp.771–788. DOI: 10.1007/s12061-023-09502-5.

10. Bao S. et al. Optimizing watchtower locations for forest fire monitoring using location models // *Fire safety journal*. Num. 71., 2015. Pp. 100–109. DOI: 10.1016/j.firesaf.2014.11.016.

11. Havrys A., Yakovchuk R., Pekarska O., Tur N. Visualization of Fire in Space and Time on the Basis of the Method of Spatial Location of Fire-Dangerous Areas. *Ecological Engineering and Environmental Technology*, 24(2), 2023. Pp. 28 – 37. DOI: 10.12912/27197050/156971.

12. Renkas, A., Popovych, V., Rudenko, D. Optimization of Fire Station Locations to Increase the Efficiency of Firefighting in Natural Ecosystems. *Environmental Research, Engineering and Management*, 78(1), 2022. Pp. 97 – 104. DOI: 10.5755/j01.ere.m.78.1.25581.

13. Global fire map and data. NASA.

URL: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map/> (дата звернення: 11.02.2024).

14. Головне управління ДСНС України у Львівській області. Структура. URL: <https://lv.dsns.gov.ua/uk/struktura> (дата звернення: 11.02.2024).

15. Krajowy System Ratowniczo-Gaśniczy. Organizacja KSRG. URL: <https://www.gov.pl/web/kgpsp/organizacja-ksrg> (дата звернення: 12.01.2024).

16. Liu L. et al. The application of Voronoi algorithm in the planning of forest-fire // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 490, Issue 4. Pp. 1–4. DOI: 10.1088/1757-899X/490/4/042008.

17. Яковчук, Р. С., Лоїк В. Б., Синельников О. Д., Ковальчук В. М. Обґрунтування моделі механізму цивільного захисту організації північноатлантичного договору та його активації в умовах особливого періоду в Україні. «Науковий вісник: Державне управління», (2 (12), 2022. С.165–181. DOI: 10.33269/2618-0065-2022-2(12)-165-181.

References

1. Derzhavne ahentstvo lisovykh resursiv Ukrayiny [State Agency of Forest Resources of Ukraine]. URL: <https://forest.gov.ua/agentstvo/polozhennya-pro-derzhlisagentstvo> (date of application 15.12.2023).

2. Analichna dovidka pro pozhezhi ta yikh naslidky v Ukrayini za 12 misyatsiv 2022 roku [Analytical report on fires and their consequences in Ukraine for 12 months of 2022]. URL: <https://idundcz.dsns.gov.ua/upload/1/6/0/8/6/7/7/analichna-dovidka-pro-pojehi-122022.pdf> (date of application 15.12.2023).

3. Cherez pozhezhi u 2022 rotsi Ukrayina vzhe vtratyla v 30 raziv bil'she lisiv, nizh u poperedni periody [Due to fires in 2022, Ukraine has already lost 30 times

more forests than in previous periods]. URL: <https://rubryka.com/2022/11/03/cherez-pozhezhhi-u-2022-rotsi-ukrayina-vzhe-vtratyla-v-30-raziv-bilshe-lisiv-nizh-u-poperedni-periody-wwf-ukrayina/>. (date of application 17.12.2023).

4. Kuzyk, A. D., & Tovarianskyi, V. I. (2023). Vplyv voyennykh diy na lisovi ekosystemy Ukrainy ta yikh pislyavoyenne vidnovlennya [The Impact Of Military Actions On Forest Ecosystems Of Ukraine And Their Post-War Restoration]. *Visnyk L'vivskoho derzhavnoho universytetu bezpeky zhyttyediyal'nosti – Bulletin of Lviv State University of Life Safety*, Issue 27, 16–22. [in Ukrainian]. DOI: 10.32447/20784643.27.2023.02.

5. Pro zatverdzhennya Pravyl pozhezhnoyi bezpeky v lisakh Ukrainy: nakaz Derzhavnoho komitetu lisovoho hospodarstva Ukrainy vid 27.12.2004 roku №278 [On the approval of the Rules of Fire Safety in the Forests of Ukraine: order of the State Forestry Committee of Ukraine dated December 27, 2004 No. 278]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0328-05#Text> (date of application: 11.01.2024).

6. Statut diy orhaniv upravlinnya ta pidrozdiliv Operativno-ryatuval'noyi sluzhby tsyvil'noho zakhystu pid chas hasynnya pozhezh: nakaz MVS Ukrainy vid 26.04.2018 roku №340 [Statute of actions of management bodies and divisions of the Operational Rescue Service of Civil Protection during firefighting: Order of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine dated April 26, 2018 No. 340]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0802-18#Text> (date of application: 11.01.2024).

7. Hulida E. M. (2017). Vyznachennya lokalizatsiynoyi hranytsi ta chynnykiv lokalizatsiyi lisovoyi pozhezh [Determination of The Localization Border and Factors of Localization of Forest Fire]. *Pozhezhna bezpeka – Fire safety*. Issue 30, Pp. 77–82. [in Ukrainian].

8. Popovych, V., Renkas, A., & Rudenko, D. (2011). Analiz prystosovanoyi tekhniki dlya hasynnya lisovykh pozhezh [Analysis of Technique Adapted for Forest Fires Extinguishment]. *Pozhezhna bezpeka – Fire safety*. Issue 18, Pp. 139–144. [in Ukrainian].

9. Chen, Y., Wu, G., Chen, Y., & Xia, Z. (2023). Spatial location optimization of fire stations with traffic status and urban functional areas. *Applied Spatial Analysis and Policy*, 16(2), 771–788. [in English].

DOI: 10.1007/s12061-023-09502-5.

10. Bao, S., Xiao, N., Lai, Z., Zhang, H., & Kim, C. (2015). Optimizing watchtower locations for forest fire monitoring using location models. *Fire safety journal*, 71, 100–109. [in English]. DOI: 10.1016/j.firesaf.2014.11.016.

11. Havrys A., Yakovchuk R., Pekarska O., & Tur N. (2023). Visualization of Fire in Space and Time on the Basis of the Method of Spatial Location of Fire-Dangerous Areas. *Ecological Engineering and Environmental Technology*, 24(2), 28 – 37. [in English]. DOI: 10.12912/27197050/156971.

12. Renkas, A., Popovych, V., & Rudenko, D. (2022). Optimization of Fire Station Locations to Increase the Efficiency of Firefighting in Natural Ecosystems. *Environmental Research, Engineering and Management*, 78(1), 97 – 104. [in English]. DOI: 10.5755/j01.erem.78.1.25581.

13. Global fire map and data. NASA. URL: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map/> (дата звернення: 11.02.2024).

14. Holovne upravlinnya DSNS Ukrainy u L'vivskiy oblasti [The main department of the State Emergency Service of Ukraine in the Lviv region. Structure]. URL: <https://lv.dsns.gov.ua/uk/struktura>. (date of application 12.01.2023).

15. National Rescue and Firefighting System. Organization of the NRFS of Poland. URL: <https://www.gov.pl/web/kgpsp/organizacja-ksrg>. (date of application 12.01.2023).

16. Liu, L., Yang, F., Wang, Z., & Wang, Y. (2019). The application of Voronoi algorithm in the planning of forest-fire. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 490, No. 4, p. 042008). IOP Publishing. [in English]. DOI: 10.1088/1757-899X/490/4/042008.

17. Yakovchuk, R., Loik, B., Synelnikov, A., Kovalchuk, V., & Polishchuk, V. (2022). Obruntuвання modeli механізму цивільного захисту організації північноатлантичного договору та його активізації в умовах особливого періоду в Україні [Reasoning for the Model of Nato's Civil Protection Mechanism and Its Activation in a Special Period in Ukraine]. *Naukovyy visnyk: Derzhavne upravlinnya – Scientific Herald: Public Administration*, 2 (12), 165–181. [in Ukrainian]. DOI: 10.33269/2618-0065-2022-2(12)-165-181.

© А. А. Ренкас, В. І. Товарианський, 2024.

Науково-методична стаття.

Надійшла до редакції 25.01.2024.

Прийнято до публікації 12.06.2024.



О. М. Слуцька¹, Т. М. Скоробагатько¹

Д. П. Войтович², Р. Ю. Сукач², І. А. Оношко²

¹*Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, м. Київ, Україна*

²*Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна*

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1723-8181> – О. М. Слуцька

<http://orcid.org/0000-0001-5651-1975> – Т. М. Скоробагатько

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

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

<https://orcid.org/0000-0001-5793-1680> – І. А. Оношко



malcastic@gmail.com

НЕОБХІДНІСТЬ УДОСКОНАЛЕННЯ ВИМОГ ДО СИСТЕМ ПОЖЕЖНОЇ СИГНАЛІЗАЦІЇ ТА ОПОВІЩУВАННЯ ВІДПОВІДНО ДО ЄВРОПЕЙСЬКОЇ НАСТАНОВИ CEN/TS 54-14:2018

Проблема. Чинні в Європі та Україні настанови щодо проектування, монтування, пусконаладжування, експлуатації та технічного обслуговування систем пожежної сигналізації та оповіщення (CEN/TS 54-14:2018) неповною мірою відповідають вимогам сьогодення і не містять чітких відповідей на ряд проблемних питань, пов'язаних із захистом приміщень такими системами. Це не дає змоги реалізувати повною мірою їхні можливості у протипожежному захисті.

Мета. Метою роботи було обґрунтування пропозицій стосовно удосконалення положень настанов щодо систем пожежної сигналізації та оповіщення для підвищення ефективності їх застосування у протипожежному захисті будівель і споруд.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети проводили теоретичні дослідження. Аналізували інформацію з наукових публікацій і монографій за напрямом досліджень, а також положення Європейських нормативних документів і настанов, розроблених об'єднаннями страхових компаній, щодо систем пожежної сигналізації та оповіщення, насамперед у частині, не охопленій загальноєвропейськими настановами.

Основні результати дослідження. Запропоновано доповнення до настанов щодо систем пожежної сигналізації та оповіщення, зокрема, удосконалену блок-схему послідовності виконання процесів, пов'язаних з ними. Розроблено алгоритм дій з метою зниження ймовірності подання хибних сигналів тривоги такими системами. Виявлено шляхи розв'язання ряду проблемних питань, пов'язаних з використанням точкових пожежних сповіщувачів для захисту приміщень. Обґрунтовано необхідність проведення подальших досліджень з метою впровадження порядку використання сучасних видів пожежних сповіщувачів і технологій побудови систем. Складено опис порядку використання світлових пожежних оповіщувачів, відсутній в європейських настановах.

Висновки. За результатами проведених досліджень обґрунтовано зміни до існуючих настанов щодо систем пожежної сигналізації та оповіщення й уточнено алгоритм дій щодо операцій, передбачених існуючими документами. Запропоновано доповнення в частині порядку визначення відстані пошуку первинних осередків пожежі після спрацювання систем, а також використання точкових пожежних сповіщувачів за наявності стель і перекриттів особливих форм, різноманітних перешкод або потужних повітряних потоків.

Ключові слова: настанови, пожежа, пожежний сповіщувач, сигнал тривоги, система пожежної сигналізації та оповіщення.

THE NECESSITY TO IMPROVE THE REQUIREMENTS FOR FIRE ALARM AND WARNING SYSTEMS FOLLOWING EUROPEAN GUIDANCE CEN/TS 54-14:2018

Introduction. The Guidelines for the design, installation, commissioning, use and maintenance of fire detection and fire alarm systems valid in Europe (CEN/TS 54-14:2018) do not meet in full today's requirements and do not contain exact answers to a number of problematic issues related to the protection of some premises using such systems. This fact does not allow realising in full of their capabilities in fire protection.

Purpose. The purpose of the work was the substantiation of the proposals for the perfection of the guidelines for the design, installation, commissioning, use and maintenance of fire detection and fire alarm systems for raising the efficiency of their application in fire protection of buildings and structures.

Methods. We conducted desk studies to reach the purpose set forth. We analysed information contained in some scientific papers and monographs dedicated to the sphere of our studies as well as regulations and guidelines valid in Europe, which have been developed by insurers' associations related to fire detection and fire alarm systems, first of all in the part not covered by the European guidelines.

Results. We proposed some amendments to the guidelines related to fire detection and fire alarm systems, particularly, an improved block diagram of the order of implementation of the processes related to them. An algorithm of actions for the purpose of the probability of sending false alarms by such systems was developed. We revealed some ways of solving a number of problematic issues concerning the use of point fire detectors in the premises protection. The necessity of conducting further research to regulate the order of the use of state-of-the-art fire detectors and technologies of systems planning was justified. A description of the order of the use of visual fire alarm devices unavailable in the European guidelines was developed.

Conclusion. As a result of the studies having been conducted, we substantiated some amendments to the existing guidelines as to the fire detection and fire alarm systems and determined more exactly the algorithm for the operations provided by available documents. We proposed some amendments in the sphere of the determination of the search distance for the initial fire beds upon systems' operation as well as the use of point fire detectors in case of the presence of ceilings and floors having specific shapes, various obstructions, or severe air streams.

Keywords: guidelines, fire, fire detector, alarm, fire detection and fire alarm system.

Постановка проблеми Загальновідомо, що найбільша кількість пожеж, під час яких трапляються загибель, травмування осіб, опіки або отруєння газоподібними продуктами згоряння, стаються всередині будівель і споруд з перебуванням людей. Чи не найбільша кількість трагічних випадків пов'язана саме з наявністю газоподібних та аерозольних (диму) летких продуктів згоряння, а також зниженням видимості внаслідок задимлення. Зниження видимості через задимлення зумовлює той факт, що людям не вдається залишити небезпечну зону вчасно або ж залишити її взагалі без допомоги пожежно-рятувальних служб, які не завжди встигають прийти на допомогу в необхідний момент: за фактом це означає, що особи, які залишаються в небезпечній зоні, загинуть або ж зазнають тілесних ушкоджень чи отруєнь того або іншого ступеня важкості, результатом яких можуть стати хронічні захворювання або навіть смерть найближчим часом. Саме тому чинний в Європі регламент щодо будівельної продукції [1] передбачає, окрім усього іншого, улаштування об'єктів будівництва з таким розрахунком, щоб вони забезпечували захист присутніх у них осіб від пожежі. Реалізація вимог цього Регламенту, як і норм, які були чинними

раніше, забезпечується першочергово через будівельні норми щодо об'єктів будівництва різноманітних видів. В Україні, на додаток до таких норм, чинні будівельні норми щодо систем протипожежного захисту як таких [2].

Аби розпочати процес евакуації у разі пожежі, людина повинна насамперед дізнатися про те, що пожежа сталася. За відсутності відповідних технічних засобів, вона зазвичай дізнається про виникнення пожежі завдяки власним органам чуттів, наприклад, побачивши полум'я чи дим або почувши мовленнєве повідомлення від іншої особи. Непрямою ознакою пожежі може бути також поява характерних запахів продуктів згоряння. На жаль, у момент, коли таке стається, пожежа, особливо на об'єктах будівництва великої площі, поверховості і складної архітектури, може бути розвинена до такої міри, що часу для безпечної евакуації не залишається або ж шляхи евакуації вже заблоковано димом та/або полум'ям. Саме тому об'єкти будівництва споряджають системами пожежної сигналізації та оповіщення (надалі – СПСО) відповідно до вимог будівельних норм. Першочергове призначення цих систем – виявлення пожеж на початкових стадіях та оповіщення про них людей, присутніх на об'єкті, а також подавання

сигналів на приведення в дію відповідного обладнання (зокрема, систем пожежогасіння).

Аналіз досліджень та публікацій

Докладніше функції СПСО викладено в стандарті [3]. Питанням, пов'язаним з конструкціями пожежних сповіщувачів, побудовою та функціонуванням СПСО, а також їх застосуванням для захисту об'єктів різного призначення присвячено ряд наукових публікацій, які стали в тому числі підґрунтям для розроблення сучасних норм щодо них. Так, наприклад, у монографії [4] описано загальні дані щодо типів пожежних сповіщувачів та їхніх особливостей, а монографію [5] присвячено опису технологій побудови систем пожежної сигналізації.

СПСО, як правило, складаються з приймально-контрольного приладу (ППКП), що відіграє роль центрального процесора, та одного або декількох шлейфів пожежної сигналізації, з'єднаних з ним. До цих шлейфів підключають автоматичні пожежні сповіщувачі, задачею яких є виявлення пожежі і передавання сигналів на ППКП, ручні пожежні сповіщувачі, призначені для приведення системи в дію у разі виявлення пожежі людиною, пожежні оповіщувачі (пристрої, що подають сигнали про пожежу у формі, зрозумілій людям), а в окремих випадках – також панелі керування, схеми об'єкта та допоміжні пристрої.

Як відомо, пожежні сповіщувачі бувають ручними й автоматичними, що реагують на одне або декілька явищ, пов'язаних з пожежею. Серед останніх розрізняють теплові, димові пожежні сповіщувачі, пожежні сповіщувачі полум'я, газові (зазвичай чутливі до монооксиду вуглецю), а також комбіновані (мультисенсорні) пожежні сповіщувачі. Теплові пожежні сповіщувачі реагують на виділення теплоти і поділяються на точкові та лінійні. Димові пожежні сповіщувачі бувають точковими та аспіраційними. Пожежні сповіщувачі полум'я реагують на зміни потужності інфрачервоного або/та ультрафіолетового випромінювання. Пізніше [6] для виявлення пожежі запропоновано застосування у складі пожежних сповіщувачів сенсорів монооксиду вуглецю як продукту згоряння, що утворюється під час пожеж. Останніми роками розроблено і впроваджено в серійне виробництво також пожежні відеосповіщувачі, здатні виявляти як полум'я, так і дим. Саме на використанні пожежних сповіщувачів усіх цих різновидів ґрунтуються положення європейських технічних специфікацій CEN/TS 54-14 [7], прийнятих в Україні як ДСТУ CEN/TS 54-14:2021.

Пожежні оповіщувачі бувають звуковими, світловими і тактильними і подають сигнали

відповідних типів, інформуючи людину про виникнення пожежі. Окрім них існують також засоби і системи мовленнєвого оповіщення, щодо яких також існують настанови (CEN/TS 54-32 [8], прийняті в Україні як ДСТУ CEN/TS 54-32:2019).

В літературі трапляються також описи інших видів пожежних сповіщувачів або ж дослідних зразків таких пристроїв. Публікація [9] описує використання фотоакустичного ефекту для побудови пожежних сповіщувачів. У статті [10] розглянуто застосування пожежних сповіщувачів, що використовують радіохвилі, для виявлення пожеж. Зазначено, що такі пожежні сповіщувачі можуть бути більш чутливими під час виявлення тліючих пожеж, ніж димові або газові пожежні сповіщувачі. Проте ці розробки, за наявними даними, до промислового виробництва не доведено. Про це непрямо свідчить той факт, що їх не описано ані в [7], ані в настановах, розроблених об'єднаннями страхових компаній [11, 12], які зазвичай більш “прогресивні”, аніж загальноєвропейські норми.

Розвиток комп'ютерної техніки і технологій штучного інтелекту також залишають свій відбиток у сфері СПСО. Зокрема, в роботі [13] викладено інформацію щодо останніх досягнень і нових напрямків виявлення пожеж за допомогою систем, побудованих на основі алгоритмів машинного навчання. Публікацію [14] присвячено опису можливостей виявлення пожеж за появою полум'я і диму та аналізу їхніх параметрів із застосуванням комп'ютерних технологій і нейромереж. Зазначено, що пожежні сповіщувачі, побудовані за цими принципами, надійніші за традиційно використовувані.

Численні публікації (наприклад, [15-17]) містять дані щодо застосування СПСО на об'єктах, де виявлення пожеж пов'язане з додатковими труднощами через значну висоту стель або особливості геометричної будови (наприклад, промислові підприємства, будинки з атріумом), високу швидкість повітряних потоків (наприклад, центри обробки даних) та ін. Більше того, у роботах [15, 16] описано технології побудови систем для захисту центрів обробки даних з часовим інтервалом у 25 років. Варто зауважити, що найбільш вдалим рішенням для таких об'єктів виявилось застосування аспіраційних пожежних сповіщувачів, використанню яких присвячено окремі настанови [18].

Чимало статей (зокрема, [19-21]) присвячено також питанням, пов'язаним зі статистикою хибних спрацьовувань СПСО та різноманітним прийомом, спрямованим на зменшення їхньої ймовірності. Проблема хибних спрацьовувань СПСО настільки суттєва, що в усіх

вищезазначених настановах також приділено їй значну увагу. Чи не найповніше цю проблему та способи зменшення кількості хибних спрацьовувань викладено в британських нормах серії BS 5839 [22].

Технічні вимоги і методи випробувань більшості компонентів СПСО унормовано європейськими стандартами, проте єдиного регіонального стандарту щодо самих систем до цього часу не існує, чинні згадані європейські технічні специфікації CEN/TS 54-14 [7]. Причиною цього є те, що члени комітету стандартизації TC 72 “Fire Detection and Fire Alarm Systems” не досягли консенсусу стосовно положень норм. Це зумовлено суттєвими відмінностями в будівельних нормах різних країн, особливостями промислового виробництва в них, різною усталеною практикою, традиціями, що склалися історично, а також кліматичними особливостями регіонів і зумовленими ними особливостями облаштування будівель і споруд інженерними системами та теплоізоляцією.

Наостанок залишається зауважити, що у світі (в тому числі в Україні) прийнято міжнародні технічні специфікації щодо пожежних відеосповіщувачів [23], проте жодними чинними в Європі настановами їх використання наразі не регулюється.

Як бачимо, інформація щодо можливостей компонентів СПСО на сьогодні “розкидана” у численних нормативних документах і настановах, що ускладнює її пошук та використання. У наукових публікаціях містяться дані про окремі різновиди/типи пожежних сповіщувачів, які в більшості своїй наразі не доведено до серійного виробництва. Зважаючи на те, що в тексті самих технічних специфікацій CEN/TS 54-14 [7] зазначено, що їх розроблено для використання у ролі “шаблону” для створення європейських і (або) національних норм, оновлення і доповнення положень цього документа, з метою розробити відповідні національні стандарти, є актуальною науково-технічною задачею, обґрунтуванню

шляхів розв’язання якої і присвячено цю роботу.

Метою роботи є обґрунтування пропозицій стосовно удосконалення положень настанов щодо СПСО для підвищення ефективності їх застосування у протипожежному захисті будівель і споруд.

Методи дослідження Для досягнення поставленої мети проводили теоретичні дослідження. Аналізу піддавали інформацію, подану в вищезазначених наукових публікаціях і монографіях за напрямом досліджень, а також положення чинних в Європі нормативних документів і настанов, розроблених об’єднаннями страхових компаній, щодо СПСО, насамперед у частині, не охопленій загальноєвропейськими настановами.

Результати Проведення вищезазначених публікацій, нормативних документів і настанов, а також досвіду застосування їхніх вимог не практиці, дав змогу визначити пріоритетні напрямки коригування настанов CEN/TS 54-14 [7]. Це дало певні результати.

Як вже зазначалося, в CEN/TS 54-14 [7] (п. 4.1) вказано, що документ містить рекомендації, які не є обов’язковими, але “являють собою належне підґрунтя для улаштування та експлуатації справних систем”. Саме тому блок-схема послідовності виконання процесів, пов’язаних з ідеалізованою системою, (рисунком 1 CEN/TS 54-14 [7]) не враховує особливостей взаємопов’язаних нормативних документів, чинних у різних країнах. Зокрема, вона не дає відповіді на питання про те, хто саме повинен займатися і як потрібно документувати побудову, проектування системи, пусконаладжувальні роботи і введення в експлуатацію, а також експлуатування та періодичні перевірки функціональності системи. З цієї причини запропоновано алгоритм дій, який може усунути ці недоліки і, на думку авторів, придатний до застосування в різних країнах незважаючи на відмінності в чинній у них нормативно-правовій базі (рисунком 1).

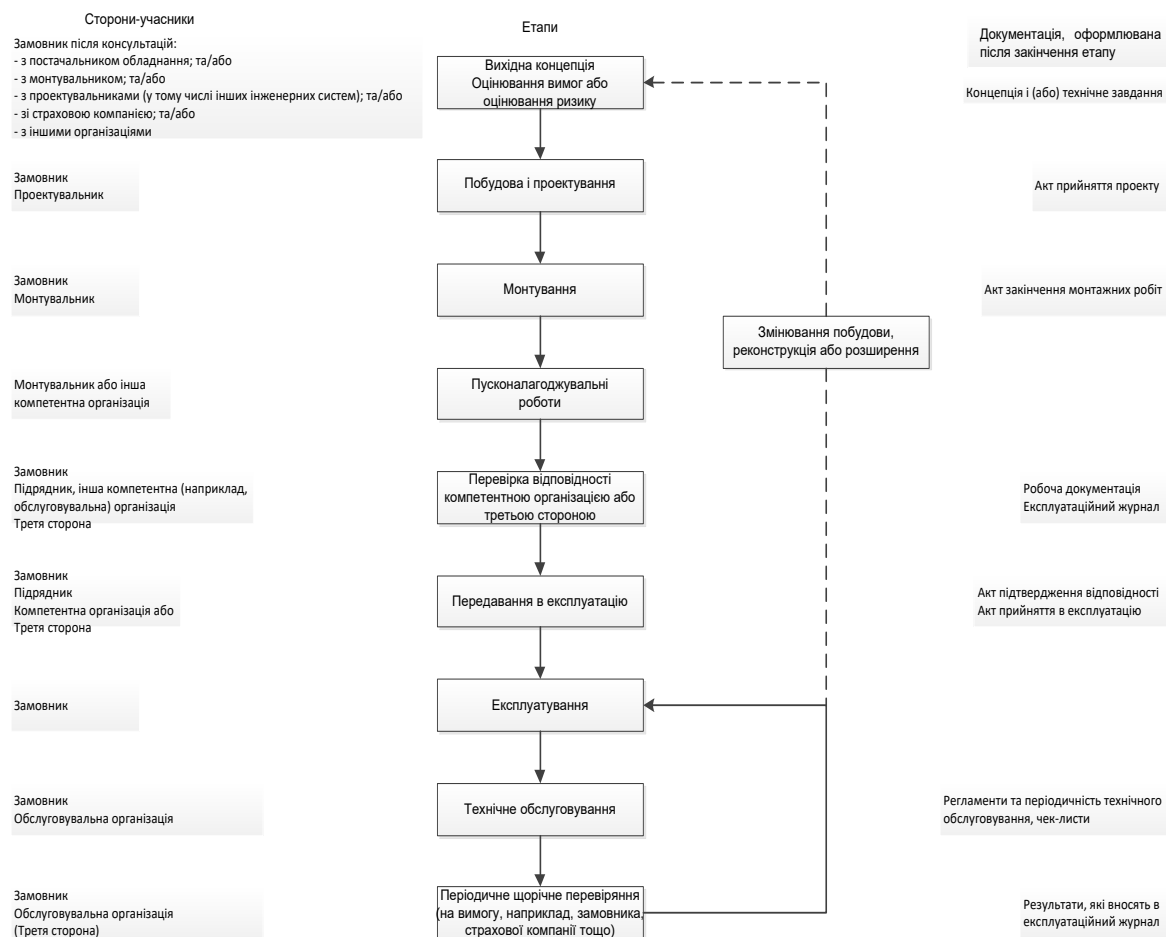


Рисунок 1 – Пропонована блок-схема послідовності виконання процесів, пов'язаних з СПСО

Аспекти, пов'язані з оцінюванням вимог до СПСО, а також принципами їх побудови із забезпеченням максимальної ефективності в цілому зрозумілі, проте особливості захисту окремих видів приміщень, особливо за наявності окремих видів конструкцій стель, містять багато неясностей. Так, наприклад, CEN/TS 54-14 [7] передбачає поділ будинку на зони пожежної сигналізації та зони оповіщення, межі яких мають відповідати вимогам, встановленим послідовністю дій у разі сигналу пожежної тривоги. Водночас, площа окремої зони не повинна перевищувати 2000 м² або в ній не повинно бути більше 32 точкових пожежних сповіщувачів, або ж відстань пошуку в ній, виміряна від точки входу в зону, не повинна бути більшою за 60 м (п. 6.3.2 b)).

Саме формулювання останнього положення нерідко стає причиною нерозуміння цієї вимоги особами, які займаються проектуванням систем пожежної сигналізації та оповіщення. Зважаючи на це, під цим поняттям розуміють відстань, яку повинен подолати черговий персонал у межах зони пожежної сигналізації для візуального визначення місцеположення осередку пожежі, до цього пункту доцільно було б додати ілюстративний матеріал, як це зроблено, наприклад, у британських нормах [22].

Оскільки відстань пошуку може залежати значною мірою не тільки від конфігурації та призначення приміщення, але й від наявного меблювання та інших предметів, які можуть стати завадами для виявлення осередків пожежі, цей аспект також необхідно описати в майбутніх нормах.

Практика свідчить, що подана в п. 6.4.2 CEN/TS 54-14 [7] інформація часто не дає проектувальникам змоги усвідомити принципові відмінності у можливостях, які характерні для аспіраційних димових пожежних сповіщувачів, і якими вони принципово відрізняються від точкових пожежних сповіщувачів усіх відомих типів. Те саме стосується вибору категорій систем з аспіраційними димовими пожежними сповіщувачами за чутливістю. Проте відповідь на ці питання дають настанови [14, 16, 18], положення яких можна було б взяти за основу під час майбутнього коригування CEN/TS 54-14 [7].

Аспіраційні димові пожежні сповіщувачі відрізняються від інших більшою доступністю для технічного обслуговування, можливістю використання з метою компенсації відхилень від будівельних норм, ефективністю виявлення пожежі у разі сильного задимлення, а також можливістю використання за наявності перепон, що унеможливають використання променевих

димових пожежних сповісуювачів. Відсутність цієї інформації в чинних європейських настановах [7] обмежує застосування описаних прогресивних технологій для захисту складів з високостелажним зберіганням продукції, приміщень для обробки інформації тощо.

Проте найбільша кількість питань у проектувальників виникає саме щодо розміщення автоматичних і ручних пожежних сповісуювачів. Загальний і цілком логічний принцип [7] полягає в тому, що ручні пожежні сповісуювачі потрібно розміщувати в місцях, де ними можуть легко скористатися особи, які виявили ознаки пожежі, а автоматичні пожежні сповісуювачі – в місцях, де вплив летких продуктів згоряння або інших чинників пожежі на їхні сенсори спричинить якомога більш раннє спрацювання системи пожежної сигналізації (переважно під стелями, покриттями та великими горизонтальними конструкціями на проміжних рівнях).

Питання, пов'язані з розміщенням пожежних сповісуювачів під рівними стелями і покриттями, в цілому зрозумілі, проте їх розміщення під стелями (покриттями) з ухилом або іншої форми регламентоване недостатньо чітко. Так, відповідно до п. 6.5.1 b) CEN/TS 54-14 [7], “якщо захищуваний простір знаходиться під скатною покрівлею, то пожежні сповісуювачі слід встановлювати усередині кожного гребеня покрівлі. Якщо різниці висот нижньої частини

гостроверхої покрівлі і верху гребеня покрівлі менша за 600 мм, то покрівлю можна розглядати як рівну у разі використання димових пожежних сповісуювачів. Якщо над захищуваним простором встановлено “скандинавську” (гребенясту) покрівлю, то пожежні сповісуювачі слід встановлювати усередині гребеня покрівлі на його похилій частині на відстані за вертикаллю 1,0 м від найвищої точки зубця”.

Подібні формулювання збивають з пантелику не тільки проектувальників, але й експертів. Шукаючи вихід з цієї ситуації автори орієнтувалися саме на те, що сенсор пожежного сповісуювача у разі виникнення пожежі має спрацювати якомога раніше. В доступній науковій літературі відповіді на таке питання не знайдено, проте настанови VdS 2095 [12] подають варіант рішення. Проаналізувавши відстані між сенсорами пожежних сповісуювачів і стелями, рекомендованими ними, ми дійшли висновку, що документом передбачене застосування саме того принципу, на який орієнтувалися автори цієї роботи. Відповідні схеми показано на рисунку 2. Величини відстаней, які не вказано, встановлено названими настановами залежно від параметрів стелі. Внесення такого ілюстративного матеріалу разом з відповідними числовими значеннями в документ, який буде прийнято на заміну CEN/TS 54-14 [7], дасть змогу уникнути численних проблем з захистом об'єктів із стелями і покриттями подібних форм.

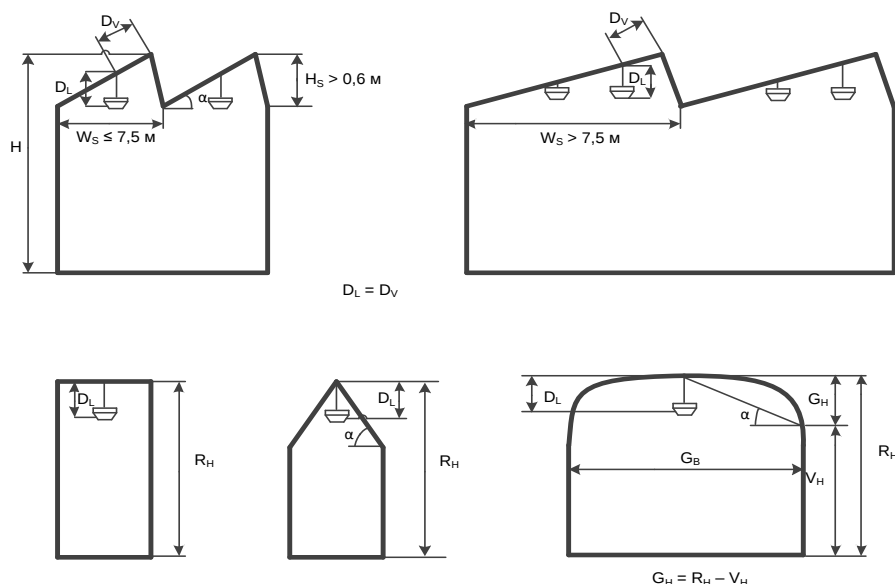


Рисунок 2 – Розміщення і розташування точкових димових пожежних сповісуювачів за різних форм стель і покриттів

На рух диму, газоподібних продуктів згоряння і теплових потоків впливають будівельні конструкції, особливо ті, що розташовані в верхній частині приміщення, технологічне обладнання, складовані вироби, а

також інженерні системи та обладнання. Саме тому CEN/TS 54-14 [7] передбачає нормування відстані між ними і стінами та перегородками, між самими пожежними сповісуювачами, а також наявність вільного простору між ними і

складованими виробами не менше ніж 500 мм. Натомість відсутня відповідь на питання щодо розміщення точкових пожежних сповіщувачів відносно освітлювальної арматури та інших засобів і перешкод, що можуть бути в наявності на стелі або поблизу неї і значною мірою спотворювати рух диму, нагрітих газоподібних продуктів і навіть спричинити хибні спрацювання. Водночас, вивчення

літературних джерел і норм свідчить, що за основу можна взяти рекомендації, подані в британських нормах BS 5839 [22]. Зокрема, високі стелажи для зберігання продукції під час визначення місцеположень пожежних сповіщувачів можна розглядати як стіни, а їх розміщення відносно стельової арматури виконувати так, як показано на рисунку 3 а). Те саме стосується стельових балок (рисунок 3 б)).

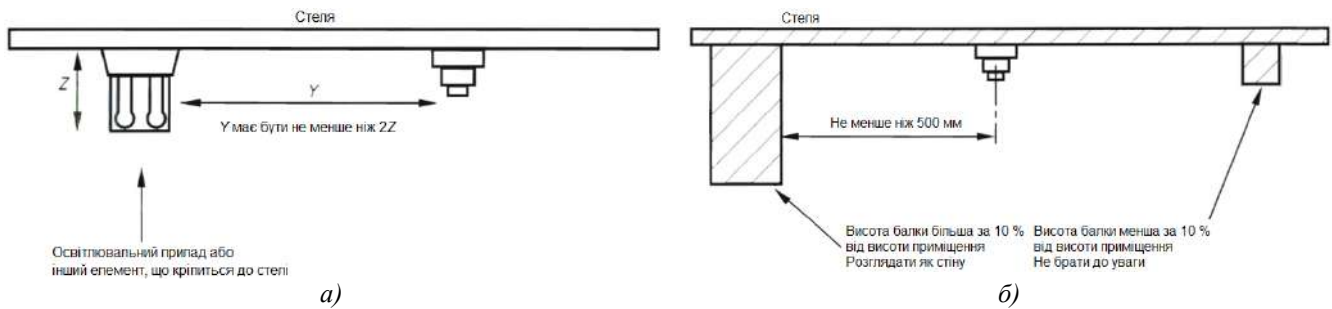


Рисунок 3 – Розміщення пожежних сповіщувачів: а) точкових відносно стельової арматури; б) за наявності стельових перешкод

Ще більш складним є розуміння того, яким чином захищати стелі із стільниками. Зокрема, в [7] зазначено: “Якщо форма стелі така, що вона являє собою групу невеликих відсіків (як у стільниках), то один точковий пожежний сповіщувач може захищати групу відсіків у межах граничних значень радіуса, вказаних у таблиці 1. Внутрішній об’єм відсіків, захищуваних одним пожежним сповіщувачем, не повинен перевищувати:

- для теплових пожежних сповіщувачів:
 $V = 6 \text{ м}^2 \times (H - h);$
- для димових пожежних сповіщувачів:
 $V = 12 \text{ м}^2 \times (H - h),$
- де H – висота стелі (або порожнини), м,

h – глибина балки, м”.

На додаток до неабиякої уяви, виконання цієї вимоги пов’язане з питанням: де саме встановлювати пожежний сповіщувач – на нижній межі балки чи на самій стелі? Аби забезпечити виявлення пожежі на якомога більш ранній стадії, встановлювати пожежні сповіщувачі потрібно було б на стелі в межах кожного стільника, проте це може бути недоцільно з техніко-економічних міркувань, адже площа стільника може бути дуже малою. На нашу думку, найкраще рішення в такому випадку – це підхід, регламентований BS 5839 [22] (рисунок 4).

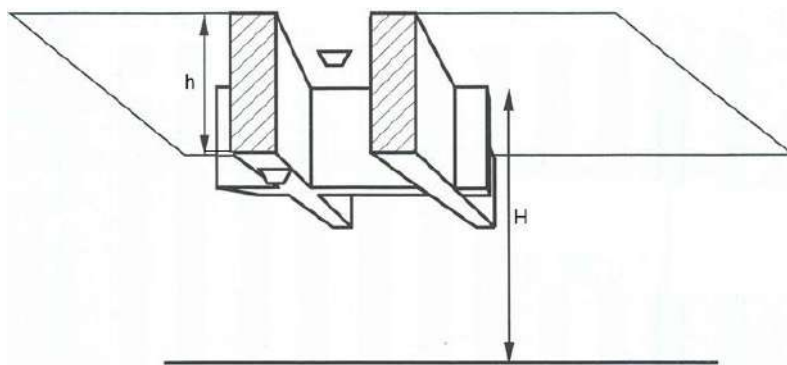


Рисунок 4 – Розміщення пожежних сповіщувачів на стелі із стільниками

Це означає, що пожежні сповіщувачі можна встановлювати як на стелі всередині стільника, так і на перегородках, якими передбачено поділ на стільники. Якщо проектувальник СПСО вважає, що об’єм стільників достатньо великий

для того, щоб оснащення кожного з них пожежним сповіщувачем було економічно виправданим, то він може передбачити саме таке рішення. В іншому випадку пожежні сповіщувачі дозволено встановлювати на самих перегородках

з дотриманням вищезазначених вимог щодо граничного сумарного об'єму захищуваних стільників. Водночас, із збільшенням висоти стель ширина шлейфа летких продуктів згорання в міру його підйому зростає все більше, тобто ймовірність того, що спочатку буде заповнено простір лише одного стільника без впливу на пожежний сповіщувач, встановлений поруч на перегородці, знижується. Відповідно, ймовірність спрацювання цього сповіщувача зростає.

На жаль, CEN/TS 54-14 [7] приділяє замало уваги захисту так званих особливих пожежонебезпечних об'єктів, зокрема, приміщень для електронної обробки даних. Вказується, що особливу увагу під час проектування СПСО для таких приміщень потрібно приділяти таким аспектам, як інтенсивна вентиляція, необхідність виявлення пожежі у прихованих просторах, наявність повітряних потоків усередині них, наявність пристроїв для керування системами вентиляції та кондиціонування повітря (ОВКП), перекривання протипожежних клапанів за сигналами від СПСО, а також наявність пристроїв для змінювання режиму роботи ОВКП у разі пожежі. Докладнішу інформацію стосовно вибору типів і розміщення точкових пожежних сповіщувачів викладено, зокрема, у настановах [18], які можна було б взяти за основу під час майбутніх розробок.

Варто також зазначити, що останніми роками у світі розроблено ряд моделей пожежних відеосповіщувачів [17], а також міжнародні технічні специфікації щодо них [23]. Станом на сьогодні можливість і порядок їх використання CEN/TS 54-14 [7] не унормовані, і цей недолік, безумовно, потрібно буде усунути в майбутньому під час розроблення відповідних норм. До того ж, незважаючи на наявність в документі уривкової інформації щодо мультисенсорних пожежних сповіщувачів, він не дає відповідей на численні питання, пов'язані з випадками, коли їх використання найбільш доцільне.

Важливою задачею СПСО є подання сигналу про пожежу у формі, зрозумілій людині. Для цього у складі систем використовують, як правило, звукові або світлові пожежні оповіщувачі, а також засоби мовленнєвого оповіщення, щодо яких існують окремі норми [8]. І якщо в [7] доволі чітко описано вимоги щодо встановлення та рівнів гучності звуку від звукових пожежних оповіщувачів, то інформації стосовно світлових пожежних оповіщувачів (п. 6.6.3), на нашу думку, замало. Водночас, результати аналізу положень [7, 8, 11, 12], а також логічні міркування дають змогу сформулювати такі рекомендації щодо них:

- світлові сигнали оповіщення потрібно

подавати в приміщеннях, де рівні фонового шуму перевищують 90 дБА, а також там, де за звичайних умов люди можуть користуватися засобами захисту органів слуху. Пожежні оповіщувачі потрібно передбачати в достатній кількості та розміщувати таким чином, щоб їх можна було легко побачити з усіх точок, куди зазвичай мають доступ люди, за нормальних рівнів фонові освітленості;

- світлові пожежні оповіщувачі мають блимати з частотою від 30 до 130 спалахів на хвилину. Сигнали від цих оповіщувачів мають бути такими, які легко відрізнити від інших світлових сигналів, що подаються на об'єкті, бажано, щоб їх колір був червоним. Сила світла на їхніх виходах має бути достатньою для привернення уваги (але не спричинити зниження видимості через надмірну яскравість), а висота монтування має бути не меншою за 2,1 м.

Наостанок залишилося сказати, що однією з найсуттєвіших проблем, пов'язаних з роботою СПСО, є формування ними хибних сигналів тривоги. До найпоширеніших причин їх виникнення належать [7]:

- роботи, які проводять на захищуваній площі без знання або нехтуючи відповідними запобіжними заходами, таких як вимикання автоматичних пожежних сповіщувачів;

- чинники навколишнього середовища, такі як теплота, дим, полум'я, водяна пара або пил, що утворюються під час готування їжі, технологічних процесів, або відпрацьовані гази від двигунів;

- механічні та електричні несправності, часто такі, що виникають під впливом вібрації, удару або корозії;

- роботи з технічного обслуговування або випробування, які проводять без попереднього повідомлення пожежно-рятувального підрозділу або чергового персоналу центру приймання тривожних сповіщень;

- перехідні електричні процеси (такі, що виникають від дії блискавки або під час вмикання електрообладнання) або радіозавади;

- неналежне проведення регламентних робіт;

- накопичування пилу або бруду у пожежному сповіщувачі або потрапляння в нього комах;

- зміна призначення або перепланування будинку без внесення належних змін у систему пожежної сигналізації та оповіщення;

- випадкове або навмисне введення в дію ручних або автоматичних пожежних сповіщувачів.

На додаток до цього опису, настанови CEN/TS 54-14 [7] містять інформацію щодо уразливості пожежних сповіщувачів різних типів, а також певні рекомендації щодо зниження ймовірності подання ними хибних сигналів тривоги. Водночас, документ не встановлює

єдиного алгоритму дій, спрямованих на зниження частоти (ймовірності) їх подання. Проте систематизація наявної інформації та урахування

рекомендацій [22] дають змогу сформувати єдиний алгоритм (блок-схему) дій, спрямованих на досягнення такої мети (рисунк 5).

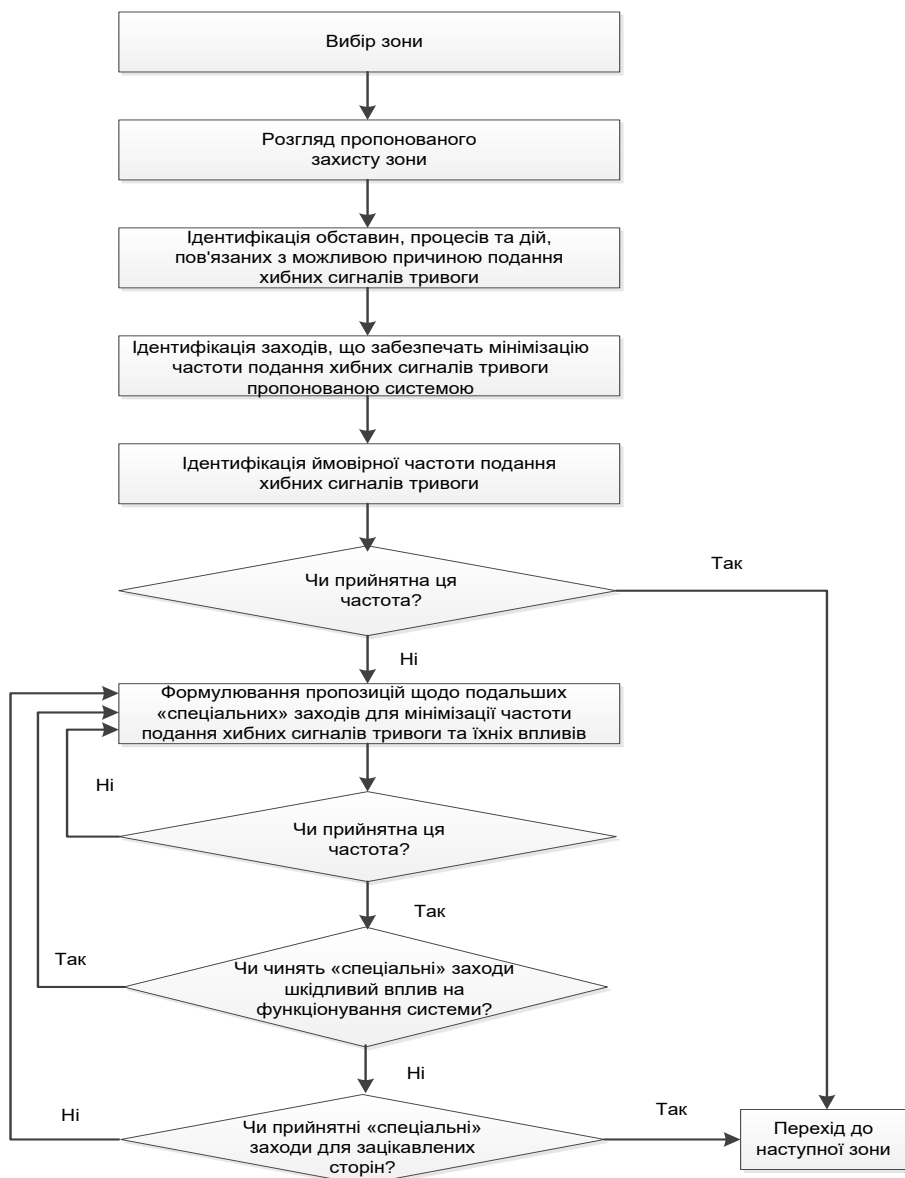


Рисунок 5 – Пропонована блок-схема дій з метою обмеження частоти подання хибних сигналів тривоги

Наостанок залишається сказати, що застосування технологій штучного інтелекту у побудові та функціонуванні СПСО, про яке йдеться, зокрема, в роботах [13, 14], на нашу думку, на сьогоднішній день розвинене недостатньою для унормування мірою. Розробка рекомендацій щодо їх застосування є предметом подальших досліджень.

Висновки

Таким чином, в результаті аналітичних досліджень обґрунтовано необхідність доповнення і коригування CEN/TS 54-14:2018 [7] внесенням таких змін:

1. Докладне тлумачення алгоритму дій під час побудови, проектування, монтування, пусконаладжування, експлуатації та технічного

обслуговування СПСО із зазначенням відповідальних осіб і відповідних документів. Таке тлумачення у нормах, які буде розроблене в майбутньому, запропоновано подати у вигляді блок-схеми, розробленої авторами.

2. Уточнення порядку визначення відстані пошуку, порядку використання точкових пожежних сповіщувачів для захисту стель із стільниками, а також їх установлення під стелями і покрівлями особливих геометричних форм (овальних, загострених, похилих). Таке уточнення запропоновано зробити виходячи з логічних міркувань, описаних вище, а також наведених прикладів.

3. Уточнення порядку використання точкових

пожежних сповіслювачів залежно від наявних перешкод (будівельні конструкції, інженерні системи, технологічні обладнання, меблювання), а також призначення об'єктів/приміщень, характеристики повітряних потоків тощо; наведення докладнішої інформації щодо використання мультисенсорних пожежних сповіслювачів; внесення інформації про порядок використання пожежних відеосповіслювачів. Питання щодо унормування порядку використання інших типів і різновидів пожежних сповіслювачів необхідно розглядати у міру їх доведення до серійного виробництва. Те саме стосується застосування технологій штучного інтелекту.

4. Доповнення інформації щодо використання аспіраційних димових пожежних сповіслювачів з урахуванням класів їхньої чутливості для захисту об'єктів, таких як склади з високостелажним зберіганням продукції, центри обробки даних, виробничі цехи, громадські об'єкти з високими стелями (в тому числі будівлі з атріумом) та ін.

5. Систематизація даних щодо причин формування хибних сигналів тривоги, уразливості пожежних сповіслювачів різних типів до причин їх виникнення, а також заходів щодо запобігання виникненню таких сигналів.

Список літератури:

1. Regulation (EU) No 305/2011 of the European Parliament and of the Council of 9 March 2011 laying down harmonised conditions for the marketing of construction products and repealing Council Directive 89/106/EEC: затверджено рішенням Європейського Парламенту і Ради Європи від 09.03.2011 (OJ L 088 4.4.2011, р. 5). Дата оновлення: 25.06.2019. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2011/305/2021-07-16> (дата звернення 24.01.2024).
2. ДБН В.2.5-56:2014. Системи протипожежного захисту. Зі зміною №1. [Чинний від 2019-11-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2019. 97 с.
3. ДСТУ EN 54-1:2022. Системи виявлення пожежі та пожежної сигналізації. Частина 1: Вступ (EN 54-1:2021, IDT). [Чинний від 2023-12-31]. Вид. офіц. Київ: ДП "УкрНДНЦ", 2023. 18 с.
4. Fitzgerald, R., Meacham, B. (2017). Fire Performance Analysis for Buildings – Part 11: Fire detection. Second Edition. 2017. 720 p. ISBN: 978-1-118-65709-6.
5. Enis Cetin, A. Merci, B., Günay, O. (February 15, 2016). Methods and Techniques of Fire Detection: Signal, Image and Video Processing Perspectives. 2016. 95 p. ISBN-10: 0128023996, ISBN-13: 978-0128023990.
6. Choi, S.-G., Young, J.-S., Park, S.-M., Nam, Y.-J., Kim, S.-K. (2020). Basic Research on Potential Application of Fire Detection by Measuring Fire Detection Tendency of Indoor Air Quality Measurement Factors. *Fire Science and Engineering*. 2020. Vol. 37, No. 1. P. 37-46. DOI: 10.7731/KIFSE.2020.34.1.037.
7. CEN/TS 54-14:2018. Fire detection and fire alarm systems – Part 14: Guidelines for planning, design, installation, commissioning, use and maintenance. [Чинні від 2018-03-02]. (Інформація та документація).
8. CEN/TS 54-32:2015. Fire detection and fire alarm systems – Part 32: Planning, design, installation, commissioning, use and maintenance of voice alarm systems. [Чинні від 2015-03-14]. (Інформація та документація).
9. Nebiker, P.W., Pleisch, R.E. (2002). Photoacoustic gas detection for fire warning. *Fire Safety Journal*. 2002. Vol. 37, Issue 4. P. 429-436. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0379-7112\(02\)00020-6](https://doi.org/10.1016/S0379-7112(02)00020-6).
10. Kempka, T., Kaiser, T., Solbach, K. (2006). Microwaves in fire detection. *Fire Safety Journal*. 2006. Vol. 41, Issue 4. P. 327-333. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2005.12.008>.
11. CEA 4040:2003. Planning and Installation for Automatic Fire Detection and Fire Alarm Systems. [Чинні від 2003-07]. (Інформація та документація).
12. VdS 2095:2022-06. Fire detection/alarm systems – Planning and Installation. [Чинні від 2022-06]. (Інформація та документація).
13. Diaconu, B.M. (2023). Recent Advances and Emerging Directions in Fire Detection Systems Based on Machine Learning Algorithms. *Fire*. 2023. Vol. 6 (11). 441. DOI: <https://doi.org/10.3390/fire6110441>.
14. Ryu, J., Kwak, D. (2022). A Study on a Complex Flame and Smoke Detection Method Using Computer Vision Detection and Convolutional Neural Network. *Fire*. 2022. Vol. 5 (4). 108. DOI: <https://doi.org/10.3390/fire5040108>.
15. Johnson, P.F. (1986). Fire detection in computer facilities. *Fire Technology*. 1986. Vol. 22. P. 14-92.
16. Johnson, P.F. (1986). Fire detection in computer facilities: 25 years on. *Fire Technology*. Vol. 465. P. 806-820.
17. Gottuk, D.T., Dinaburg, J.B. (2013). Video Image Detection and Optical Flame Detection for Industrial Applications. *Fire Technology*. 2013. Vol. 49, No. 2. P. 213-251. DOI: 10.1007/s10694-012-0254-0.
18. Design, Installation, Commissioning and Maintenance of Aspirating Smoke Detector (ASD) Systems / Fire Industry Association. URL: <https://www.fia.uk.com/static/uploaded/440ce5b2-6824-4fdb-ab20a887f80722d6.pdf>. (дата звернення 2024-01-24).
19. Festag, S. (2016). False alarm ratio of fire detection and fire alarm systems in Germany – A meta analysis. *Fire Safety Journal*. 2016. Vol. 79. P. 119-126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2015.11.010>.
20. Luck, H., Hase, K.-R. (1983). Signal detection aspects in automatic fire detection. *Fire Safety Journal*. 1983. Vol. 6, Issue 3. P. 233-240. DOI: [https://doi.org/10.1016/0379-7112\(83\)90075-9](https://doi.org/10.1016/0379-7112(83)90075-9).
21. Luck, H. (1991). Dedicated detection algorithms for automatic fire detection. *Fire Safety Science*. 1991. No. 3. P. 135-148.

DOI: <https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.3-135>.

22. BS 5839. Fire detection and fire alarm systems for buildings. (усі частини). (Інформація та документація).

23. ISO 7240-29:2024. Fire detection and alarm systems – Part 29: Video fire detectors. [Чинний від 2024-01-01]. (Інформація та документація).

References:

1. Regulation (EU) No 305/2011 of the European Parliament and of the Council of 9 March 2011 laying down harmonised conditions for the marketing of construction products and repealing Council Directive 89/106/EEC: approved by Decision of the European Parliament and Council of 2011-03-09 (OJ L 088 4.4.2011, p. 5). Amendment date: 2019-06-25. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2011/305/2021-07-16> (Access date 2024-01-24).

2. DBN V.2.5-56:2014. Systemy protypozhezhnoho zakhystu. Zi zminoiu №1. [Fire protection systems. With amendment No. 1.]. (2014). Vyd. ofits. Kyiv: Minrehion Ukrainy, 2019. 97 p.[in Ukrainian].

3. DSTU EN 54-1:2022. Systemy vyaviavlennia pozhezhi ta pozhezhoi sygnalizatsii. Chastyna 1: Vstup. [Fire detection and fire alarm systems. Part 1: Introduction]. (2022). Vyd. ofits. Kyiv: DP “UkrNDNTs”, 2023. 18 p. [in Ukrainian].

4. Fitzgerald, R., Meacham, B. (2017). Fire Performance Analysis for Buildings – Part 11: Fire detection. Second Edition. 2017. 720 p. ISBN: 978-1-118-65709-6.

5. Enis Cetin, A. Merci, B., Günay, O. (February 15, 2016). Methods and Techniques of Fire Detection: Signal, Image and Video Processing Perspectives. 2016. 95 p. ISBN-10: 0128023996, ISBN-13: 978-0128023990.

6. Choi, S.-G., Young, J.-S., Park, S.-M., Nam, Y.-J., Kim, S.-K. (2020). Basic Research on Potential Application of Fire Detection by Measuring Fire Detection Tendency of Indoor Air Quality Measurement Factors. *Fire Science and Engineering*. 2020. Vol. 37, No. 1. P. 37-46. DOI: 10.7731/KIFSE.2020.34.1.037.

7. CEN/TS 54-14:2018. Fire detection and fire alarm systems – Part 14: Guidelines for planning, design, installation, commissioning, use and maintenance. [Valid from 2018-03-02]. (Information and documentation).

8. CEN/TS 54-32:2015. Fire detection and fire alarm systems – Part 32: Planning, design, installation, commissioning, use and maintenance of voice alarm systems. [Valid from 2015-03-14]. (Information and documentation).

9. Nebiker, P.W., Pleisch, R.E. (2002). Photoacoustic gas detection for fire warning. *Fire Safety Journal*. 2002. Vol. 37, Issue 4. P. 429-436.

DOI: [https://doi.org/10.1016/S0379-7112\(02\)00020-6](https://doi.org/10.1016/S0379-7112(02)00020-6).

10. Kempka, T., Kaiser, T., Solbach, K. (2006). Microwaves in fire detection. *Fire Safety Journal*. 2006. Vol. 41, Issue 4. P. 327-333.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2005.12.008>.

11. CEA 4040:2003. Planning and Installation for Automatic Fire Detection and Fire Alarm Systems. [Valid from 2003-07]. (Information and documentation).

12. VdS 2095:2022-06 Fire detection/alarm systems – Planning and Installation [Valid from 2022-06]. (Information and documentation).

13. Diaconu, B.M. (2023). Recent Advances and Emerging Directions in Fire Detection Systems Based on Machine Learning Algorithms. *Fire*. 2023. Vol. 6 (11). 441. DOI: <https://doi.org/10.3390/fire6110441>.

14. Ryu, J., Kwak, D. (2022). A Study on a Complex Flame and Smoke Detection Method Using Computer Vision Detection and Convolutional Neural Network. *Fire*. 2022. Vol. 5 (4). 108. DOI: <https://doi.org/10.3390/fire5040108>.

15. Johnson, P.F. (1986). Fire detection in computer facilities. *Fire Technology*. 1986. Vol. 22. P. 14-92.

16. Johnson, P.F. (1986). Fire detection in computer facilities: 25 years on. *Fire Technology*. Vol. 465. P. 806-820.

17. Gottuk, D.T., Dinaburg, J.B. (2013). Video Image Detection and Optical Flame Detection for Industrial Applications. *Fire Technology*. 2013. Vol. 49, No. 2. P. 213-251. DOI: 10.1007/s10694-012-0254-0.

18. Design, Installation, Commissioning and Maintenance of Aspirating Smoke Detector (ASD) Systems / Fire Industry Association. URL: <https://www.fia.uk.com/static/uploaded/440ce5b2-6824-4fdb-ab20a887f80722d6.pdf>. (Access date 2024-01-24).

19. Festag, S. (2016). False alarm ratio of fire detection and fire alarm systems in Germany –A meta analysis. *Fire Safety Journal*. 2016. Vol. 79. P. 119-126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2015.11.010>.

20. Luck, H., Hase, K.-R. (1983). Signal detection aspects in automatic fire detection. *Fire Safety Journal*. 1983. Vol. 6, Issue 3. P. 233-240.

DOI: [https://doi.org/10.1016/0379-7112\(83\)90075-9](https://doi.org/10.1016/0379-7112(83)90075-9).

21. Luck, H. (1991). Dedicated detection algorithms for automatic fire detection. *Fire Safety Science*. 1991. No. 3. P. 135-148.

DOI: <https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.3-135>.

22. BS 5839. Fire detection and fire alarm systems for buildings. (all parts). (Information and documentation).

23. ISO 7240-29:2024 Fire detection and alarm systems – Part 29: Video fire detectors. [Valid from 2024-01-01]. (Information and documentation).

© О. М. Слущька, Т. М. Скоробагатько
Д. П. Войтович, Р. Ю. Сукач, І. А. Оношко, 2024.

Оглядова стаття.

Надійшла до редакції 02.02.2024.

Прийнято до публікації 12.06.2024.



О. В. Шаповалов, С. Я. Вовк, Н. О. Ференц

І. А. Оношко, Ю. В. Кіндрацький

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8444-2006> – О. В. Шаповалов

<https://orcid.org/0000-0001-5278-3754> – С. Я. Вовк

<https://orcid.org/0000-0003-3139-0921> – Н. О. Ференц

<https://orcid.org/0000-0001-5793-1680> – І. А. Оношко

– Ю. В. Кіндрацький



o1972@ukr.net

АНАЛІЗ ТА ШЛЯХИ ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ ЛОГІСТИЧНИХ СКЛАДІВ

Проблема. Для удосконалення пожежної безпеки на складах логістичної інфраструктури можна використовувати різні підходи та методи, зокрема встановлення систем автоматичної пожежної сигналізації, автоматичних систем пожежогасіння, навчання персоналу об'єкта, розробку планів евакуації, забезпечення належного технічного обслуговування електротехнічного обладнання і систем протипожежного захисту складів, проведення навчань оперативно-рятувальних підрозділів на конкретних об'єктах, а також розробку нових вогнегасних речовин для використання в процесі гасіння, застосування відеоаналітики для швидкого і безпомилкового виявлення пожежі, що може якісно вплинути на протипожежний захист вказаних об'єктів.

Мета. Здійснення аналізу досягнень у сфері протипожежного захисту складів логістичної інфраструктури з метою знаходження оптимального, економічно доцільного складу організаційно-технічного забезпечення логістичних складів і зменшення ризиків виникнення пожеж.

Методи дослідження. Для дослідження пожежної безпеки можуть використовуватися такі методи, як аналіз ризиків, моделювання пожеж та випробування систем протипожежного захисту і їх удосконалення. Удосконалення пожежної безпеки на вказаних об'єктах є одним з напрямків вирішення задачі забезпечення безпеки персоналу, збереження майна та зменшення ризику виникнення пожежі і наслідків від її виникнення, який реалізується шляхом швидкого виявлення пожежі, оповіщення про її виникнення та її ліквідації.

Основні результати дослідження. Здійснений аналіз дасть можливість в майбутньому отримати повне розуміння аспектів пожежної безпеки на логістичних складах, виявити прогалини і слабкі місця у застосованих методах і засобах захисту складів від пожеж та розробити ефективні заходи для удосконалення протипожежного захисту на складах логістичної інфраструктури.

Висновки. Ризики, пов'язані з виникненням пожеж на логістичних складах, демонструють потребу в дослідженні і розробці більш ефективних систем протипожежного захисту на основі новітніх технологій: системи виявлення загорання з використанням аспіраційних пожежних сповіщувачів, вмонтованих в стелажі інтелектуальних точкових пожежних сповіщувачів; систем пінного та водяного пожежогасіння з особливим розташуванням зрошувачів, яке передбачає їх розміщення в центрі простору, утвореного матеріалами зберігання.

Ключові слова: протипожежний захист, логістичний склад, виявлення пожежі, ефективна ліквідація, удосконалення.

O. V. Shapovalov, S. Y. Vovk, N. O. Ferents

I. A. Onoshko, Y. V. Kindratskiy

Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine

ANALYSIS AND WAYS OF IMPROVING FIRE PROTECTION SYSTEMS OF LOGISTICS WAREHOUSES

Introduction. Various approaches and methods can be used to improve fire safety at logistics infrastructure warehouses, including installing automatic fire alarm systems, and automatic fire extinguishing systems, training facility personnel, developing evacuation plans, ensuring proper maintenance of electrical equipment and warehouse fire protection systems, conducting training operative and rescue units at specific objects, as well as the development of new fire-extinguishing

substances for use in the extinguishing process, the use of video analytics for quick and error-free fire detection can have a qualitative effect on the fire protection of the specified objects.

Purpose. Analysis of achievements in the field of fire protection of logistics infrastructure warehouses to find the optimal, economically feasible composition of organisational and technical support of logistics warehouses and reduce the risk of fires.

Methods. Methods such as risk analysis, fire modelling, sting and improvement of fire protection systems can be used for fire safety research. Improving fire safety at the specified facilities is one of the directions for solving the problem of ensuring the safety of personnel, preserving property, and reducing the risk of fire and its consequences, which is implemented through quick fire detection, notification of its occurrence, and its elimination.

Results. The analysis carried out will make it possible in the future to gain a full understanding of aspects of fire safety in logistics warehouses, to identify gaps and weaknesses in the applied methods and means of fire protection of warehouses, and to develop effective measures to improve fire protection in logistics infrastructure warehouses.

Conclusions. The risks associated with the occurrence of fires in logistics warehouses demonstrate the need for research and development of more effective fire protection systems based on the latest technologies: fire detection systems using aspiration fire detectors mounted in racks of intelligent point fire detectors; foam and water fire extinguishing systems with a special arrangement of sprinklers, which involves placing them in the centre of the space formed by the storage materials.

Keywords: fire protection, logistics warehouse, fire detection, effective elimination, improvement.

Постановка проблеми.

Збільшення товарообігу під час економічного розвитку країни та забезпечення логістики в умовах війни в Україні змушує суб'єктів господарювання організовувати місця, у яких можна було б швидко і без зайвих труднощів перевантажувати, зберігати та перенаправляти товари. Такими місцями є логістичні склади. Зважаючи на очевидну перевагу використання логістичних складів, їх стає все більше, вони розбудовуються, збільшуються за об'ємом зберігання та стають більш технологічними.

Пожежна небезпека на складах логістичної інфраструктури зумовлена рядом чинників: зберіганням великої кількості горючих і легкозаймистих матеріалів, таких як горючі рідини, газу, батареї та інші вибухонебезпечні матеріали; відсутністю або невідповідністю автоматичних систем протипожежного захисту; різними видами вентиляції та димовидалення; наявністю різних допоміжних систем з комунікаціями, які проходять через усю споруду; невідповідністю організації зберігання товарів, яка може призвести до утворення перешкод для гасіння та зниження ефективності автоматичних систем протипожежного захисту; порушенням правил зберігання пожежонебезпечних матеріалів; відсутністю або недостатньою кількістю засобів індивідуального захисту працівників від чинників пожежі; помилками в організації технологічного процесу, такими як недотримання правил експлуатації обладнання або несправність техніки, що може призвести до виникнення пожежі. Сукупність цих чинників може значно збільшувати ризик виникнення пожежі на логістичних складах.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

В сучасному суспільстві та в умовах війни в Україні зростає попит на різноманітну продукцію, збільшується важливість логістичної мережі, кількість складів також зростає, оскільки обсяг логістики збільшується, особливо у великих регіональних містах і мегаполісах.

У приміщеннях логістичних складів, в яких зберігаються товари широкої номенклатури, як стверджують автори [1], міститься величезний перелік устаткування, яке призначене для їх зберігання. В роботі автори пропонують спосіб інтелектуального контролю розповсюдження пожежі на складах. Склади можуть відрізнятися залежно від виду матеріалів, що зберігаються. Ступінь автоматизації на складі залежить від обсягів матеріалу та можливостей власників. Висота штабелювання товарів, як стверджують автори [1], є визначальним чинником з точки зору пожежної безпеки, для прогнозування об'ємно-планувальних рішень будівлі та місць і способів зберігання майна. Чинниками, які необхідно враховувати для реалізації протипожежного захисту при проектуванні складів, є площа будівлі, висота, методи зберігання, вид товару, а також чинні правила та норми.

З метою врахування впливів вказаних чинників автори [1] пропонують удосконалення протипожежного захисту приміщень складів шляхом керування соплом водяної завіси на основі програмованого логічного контролера (ПЛК), що дасть можливість уникнути швидкого поширення пожежі по площі складського приміщення.

Автори [2] запропонували план систематичного вдосконалення для посилення протипожежної здатності побутових стелажних складських будівель. Вони проаналізували пожежі у складі з конструктивними елементами з сендвіч-панелей та у складі з вогнестійкими будівельними конструкціями. Під час проведення аналізу автори [2] з'ясували, що важливим чинником у ліквідації пожеж в складських приміщеннях є їх забезпечення мобільним обладнанням для початкового гасіння пожежі, можливість доступу до споруди складу не менше ніж з трьох сторін, влаштування входів у споруду з інтервалом менше 40 м, розміщення обладнання для пожежогасіння в доступному місці на відкритому повітрі.

В результаті проведеного аналізу автори [2] дійшли висновку, що з метою надійного протипожежного захисту споруд складів та ефективної ліквідації пожеж необхідно удосконалювати стандартні операційні процедури (SOP) для кожного конкретного об'єкта з врахуванням об'ємно-планувальних рішень, можливих ризиків та можливого розвитку пожежі.

Проблеми, пов'язані з безпекою складу, описано та оцінено у роботі [3]. Автори розглядають склад як динамічний об'єкт, що працює в турбулентному середовищі. Навіть найкраще складені плани, стверджують автори, не гарантують кінцевого результату через виникнення в різних вимірах незапланованих, непередбачених ситуацій, що є наслідком навмисних і випадкових небезпек, спричинених людьми або несприятливими погодними умовами. Автори розробили методологію ідентифікації небезпек складської системи. Вони пропонують за рівнем вразливості до виникнення небезпечної ситуації раціоналізувати вибір заходів із забезпечення функціонування системи у небезпечному середовищі. Безпека будь-якого складу, стверджують автори [3], залежить від трьох груп факторів: технічних, юридичних і людських. Вони являють собою систему діяльності, яка потребує постійного вдосконалення, оскільки інноваційні рішення, нові вимоги та безпрецедентні небезпеки не перестають з'являтися.

Розподіл заходів безпеки на основі ризиків для запобігання та зменшення наслідків пожеж на складах проведено у статті [4]. Вогонь є основним небезпечним чинником для збереження майна та безпеки людей на підприємствах переробної промисловості, а також в інших галузях. Управління ризиками пожеж в складських будівлях і спорудах, в яких зберігаються матеріальні цінності, є складним процесом через потенційні причини виникнення пожеж. Як стверджують автори [4], загальна модель управління ризиками для пожеж у складських приміщеннях та спорудах відсутня. У їх роботі представлені відповідні заходи безпеки, досліджено розподіл та ефективність цих заходів безпеки для зменшення ризику пожежі на складах, розроблена методологія та запропонована загальна структура для конкретного дослідження. Ймовірність пожеж та наслідків від їх виникнення значно зменшується, що свідчить про ефективність запропонованого підходу. Загальну структуру, розроблену в дослідженні, можна пристосувати до різних випадків виникнення пожежі на складах з обмеженими маніпуляціями, а розподіл пожежної навантаги і впровадження відповідних заходів безпеки може значно знизити ризик виникнення пожежі на складі [4].

В роботі [5] на основі аналізу пожежі в логістичному складі автори визначили чотири

аспекти ризику пожежі в логістичних складах, а також розробили модель для оцінки пожежної небезпеки логістичних складів шляхом експертного дослідження з використанням методу MAI (АНР) та нечіткої комплексної оцінки. Для встановлення єдиної факторної оцінки пожежного ризику в логістичному складі використовуються чотири фактори, якими є будівля складу, матеріали які зберігаються, управління, середовище. Значення 14 індексів, які використовуються для побудови матриці і пов'язані з вторинними показниками були знайдені на основі проведених експериментів. Розроблена авторами [5] модель використовувалась для оцінки та аналізу пожежної небезпеки логістичного складу. Результати показали, що методологія оцінки пожежної небезпеки логістичного складу є обґрунтованою та ефективною. Однак автори не врахували впливу зовнішніх чинників, зокрема, небезпечних природних процесів, терористичних загроз, військових дій.

Мета роботи. Метою роботи є аналіз та шляхи вдосконалення систем протипожежного захисту на складах логістичної інфраструктури, дослідження сучасних технологій для запобігання, швидкого виявлення та гасіння пожежі.

Методи дослідження: для досягнення мети у роботі використані такі методи – методи теоретичного узагальнення і статистичний.

Для досягнення поставленої мети потрібно виконати такі завдання:

- проаналізувати способи раннього виявлення пожеж в логістичних складах;
- провести аналіз нормативних документів щодо забезпечення пожежної безпеки в логістичних складах;
- провести аналіз запропонованих рішень покращення систем виявлення та гасіння пожеж із застосуванням новітніх технологій в логістичних складах.

Результати роботи. Сучасний склад – це складна технічна споруда, яка складається з численних взаємопов'язаних елементів, має визначну структуру та виконує ряд функцій щодо перетворення матеріальних потоків, а також нагромадження, переробки і розподілу вантажів між споживачами [6].

На даний час у світа налічується більше двадцяти класифікацій складів [6]. Залежно від функцій і різноманітних характеристик, їх класифікують за такими ознаками як: галузь логістики, учасники в системі логістики, форма власності, види продукції, умови зберігання, ступінь механізації, технічні характеристики приміщень, транспортна інфраструктура, класи, функції тощо [6].

В Україні користуються міжнародною класи-

фікацією складських приміщень від брокерського агентства Knight Frank, яка базується на вимогах щодо технічних параметрів, території, обладнання й комунікацій. Згідно з нею склади поділяють на 6 класів: A+, A, B+, B, C, D [7]. Класифікація за класами від Knight Frank не бере до уваги транспортну інфраструктуру.

Згідно з ДБН В.2.2-43:2021 додаток А [7] складські будівлі класифікують за конструктивно-планувальними рішеннями, інженерними системами, площею забудови та позначають великими латинськими літерами A, B, C, D. Клас A – найвищий клас. Клас складської будівлі є одним із техніко-економічних показників проекту, який вказується у завданні на проектування.

Згідно з ДСТУ Б В.1.1-36 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою», складські будівлі та приміщення поділяють на категорії: A, B, B, D. Ступінь вогнестійкості складських будівель, залежно від категорії будівлі за вибухопожежною та пожежною небезпекою, кількості поверхів будівлі та площі поверху в межах протипожежного відсіку, приймається згідно з таблицею 1 ДБН В.2.2-43:2021 [7].

Таким чином, основна відмінність між складськими будівлями різних класів – об'ємно-планувальні рішення. Вплив об'ємно-планувальних рішень на пожежну безпеку складів розглядається у ряді робіт [1, 8, 32, 36]. Зокрема, автори [8] стверджують, що впродовж останніх років часто траплялися пожежі на складах із зовнішніми стінами виготовленими із сендвіч-панелей, а значна пожежна навантага ускладнювала заходи з пожежогасіння, і, як наслідок, спостерігалися значні матеріальні збитки. Аналізуючи причини виникнення пожеж в складах, автори [8] відзначили дві – недотримання правил пожежної безпеки та теплові прояви електричної енергії. З метою зменшення матеріальних збитків від імовірних пожеж в складах логістичної інфраструктури, необхідно оцінювати пожежну безпеку, розробляти технологію гасіння пожежі, вивчати архітектурні особливості для ефективної евакуації. Автори [8] за результатами досліджень вогнестійкості складу, запропонували архітектурні контрзаходи, такі як метод монтажу зовнішніх стін, протипожежне блокування, використання сертифікованої продукції, систему евакуації та обслуговування засобів пожежогасіння для запобігання поширенню вогню.

Дослідження альтернатив управління пожежною безпекою шляхом аналізу пожеж в складах представлено у роботі [9]. Зокрема, розглянуто причини пожежі та фактори, які сприяли її поширенню в логістичному складі в Ічхон, Кьонгі. Авторами [9] запропоновано заходи для запобігання

її повторенню. Причиною пожежі була іскра, яка виникла під час зварювальних робіт і призвела до спалаху пінополістиролу та пінополіуретану. Факторами, які сприяли поширенню пожежі, вважаються використання сендвіч-панелей з пінополістиролу та пінополіуретану і штучне відключення засобів пожежогасіння. Щоб запобігти таким надзвичайним ситуаціям, як згадувалась вище, необхідно заборонити використання сендвіч-панелей з пінополістиролу та пінополіуретану, які мають великі значення для швидкості поширення вогню, посилити моніторинг та покарання за виведення з ладу протипожежного обладнання, посилити систему управління безпекою та дотримання правил техніки безпеки.

Особливу увагу автори [3, 5, 8, 9, 10, 21, 22, 23, 40, 42,] надають пожежній безпеці складів із стелажним зберіганням товарів. Склад стелажного типу – склад, у якому стелажі встановлено в просторі з великою висотою підлоги, а предмети укладають на стелажі для їх тривимірного та ефективного зберігання. Автори [10] стверджують, що передумови та формування концентрованої спринклерної системи розроблені на основі трирічного дослідження пожеж в складах із стелажним зберіганням.

Розповсюдження полум'я під час пожежі при стелажному зберіганні відбувається дуже швидко по вертикалі. Тому, з метою швидкого реагування, автори [10] пропонують застосовувати вбудований в стійку автоматичний пожежний сповіщувач, який може виявити пожежу та повідомити про її місце на початковій стадії її розвитку і сформувати команду на відкриття електроклапана розподільних вертикальних труб. Після відкриття клапана вода витікає з концентрованого спринклера відкритого типу до димоходу та товарів, які зберігаються на полиці стелажа. Таким чином автори [10] пропонують провадити процес гасіння пожежі та зменшувати матеріальні збитки від них в складах із стелажним зберіганням.

Автори [11] розглядають пожежі на складах із стелажним зберіганням з вертикальним завантаженням товарів. Дослідження, які проводили дослідники [11] полягали в тому, щоб здійснити успішне гасіння пожежі. За результатами проведених експериментів автори зробили такі висновки: гасіння пожежі необхідно здійснювати спринклерними установками дренчерного типу із зонуванням областей на вертикальні ділянки; К-фактор спринклерних головок у стійці має бути 115 або більше, а кут розпилення води має бути 130 або менше; спринклерна головка повинна розпилювати воду протягом 4 хв 30 с з моменту виникнення пожежі; відстань по горизонталі між спринклерними головками в стійці має бути менше 2,4 м; відстань по вертикалі між спринклерними

головками в стійці повинна бути менше 2,5 м від висоти стійки; спринклерні головки в стійці повинні бути встановлені в центрі простору, утвореного матеріалами зберігання, через який виходять продукти горіння.

У роботі [12] представлені теоретичні та експериментальні дослідження пожеж у складах із стележним зберіганням. Автори проводили випробування на вільне горіння багатошарових картонних коробок з гофрованого паперу. Випробування проводилися у зменшеному масштабі. В результаті проведених експериментів за допомогою осесиметричних квазістаціонарних кореляцій степеневому закону були розраховані висота поширення полум'я, надлишкова температура та швидкість руху газу біля стійки стележа. Кореляції включають загальну швидкість конвективного виділення тепла, вертикальну ширину простору проходження продуктів горіння, висоту над підлогою та висоту віртуального походження. Отримані результати можна використовувати для прогнозування часу активації спринклерів у стійці, а також в інженерних моделях, які розроблені для прогнозування поширення полум'я та зростання пожежі у високостележних сховищах. Окрім того дослідження показує, що запропонованим способом можна відтворити умови розвитку пожежі в різних масштабах, що має практичне значення.

Для забезпечення протипожежного захисту складу із стележним зберіганням, стверджують автори [13], дуже важлива точна конструкція автоматичної спринклерної системи, тому що пожежна навантага подібних складів дуже висока і тому ліквідувати пожежу дуже важко. За допомогою програми PIPENET автори у роботі виконали гідравлічний розрахунок водопровідної мережі. Результати розрахунку проаналізували та порівняли з розрахунками, виконаними за стандартними методиками, для визначення оптимального методу проектування трубопроводної мережі для автоматичного стележного складу. Методи проектування стосуються трасування трубопроводів на основі стандарту пожежної безпеки, проектування для ефективного будівництва та проектування з використанням верхнього граничного значення трубопроводу. Схеми розміщення трубопроводів, розмір яких визначається відповідно до кількості спринклерних головок, легко розробити, але є вірогідність, що витрата води збільшиться і створеного запасу води не вистачить. Схема розміщення трубопроводів для ефективного застосування автоматичної спринклерної системи, в яких обмежується розмір діаметра розгалужувального трубопроводу, дещо збільшують вартість будівництва, але при цьому

необхідна кількість води на гасіння зменшується. Така конструкція з використанням верхнього граничного значення трубопроводу, що обмежує максимальний розмір трубопроводу і робить його меншим за певне значення, може зменшити вартість будівництва, а також кількість необхідної води, таким чином покращуючи безпеку та надійність спринклерної системи.

Автори [14], з метою дослідження протипожежного захисту складів із стележним зберіганням, провели серію із семи випробувань з використанням чотирьох прототипів спринклерів швидкого реагування. Метою проведення випробувань було визначення характеристик спринклерів, які необхідні для гасіння пожеж у чотирьохярусних стележах висотою 9,14 м. Спринклери мали номінальний К-фактор 11 або 14, а тиск на виході спринклера підтримувався на рівні 345 кПа. В якості пожежної навантаги використовували полістирольні стакани, упаковані в коробки. Їх розташовували в дворядних сталевих стележах шириною в два піддони, глибиною в два піддони і висотою в чотири яруси. Осередки займання влаштовували у трьох різних місцях відносно спринклерів. Розподіл води спринклером, за умови відсутності пожежі, та силу тяги в центрі розпилювача було визначено як ключові параметри характеристик спринклера. У результаті проведення випробувань було досліджено взаємозв'язки між розміром пожежі при першому спрацьовуванні спринклера, необхідною інтенсивністю вогнегасної речовини, що подається, розподілом води спринклером і силою тяги в центрі розпилювача. В процесі випробувань при формуванні осередку займання безпосередньо під спринклером необхідно було досягти такої інтенсивності подавання води, яка б подолати теплові конвективні потоки і забезпечила потрапляння води в зону горіння. У випадку проведення випробувань, коли тепловий конвективний потік у струмені розпиленої води був більший за інтенсивність подавання вогнегасної речовини, а середній потік води над верхньою поверхнею масиву пожежної навантаги в умовах відсутності пожежі був більшим за необхідну інтенсивність, було досягнуто локалізацію пожежі. У випадку проведення випробувань із формуванням осередку займання під двома або чотирма спринклерами, тепловий конвективний потік був здебільшого обмежений простором, утвореним у центрі складування коробок з пожежною навантагою, і більша частина води, що подавалась на гасіння, потрапляла на поверхні коробок верхнього ярусу, не проходячи через нього. Таким чином очікувалося, що виміряний потік води над верхньою поверхнею пожежної навантаги в умовах відсутності пожежі буде близьким до потоку, що подається під час

пожежі. Результатом проведених випробувань було досягнення гасіння пожежі за допомогою спринклерної системи, вогнегасна речовина якої подавалась на поверхні верхнього ярусу та бічні відкриті поверхні пожежної навантаги. Коли середня інтенсивність подачі води над верхньою поверхнею пожежної навантаги в умовах відсутності пожежі була більшою, ніж необхідна інтенсивність подачі води, було досягнуто гасіння займання.

У роботі [15] авторами досліджується розвиток пожежі у приміщенні складу із стележним зберіганням. У вказаних складах пожежна навантага на стелажах укладається вертикально. Дослідження показали, що на складі стележного типу, коли висота зберігання велика, а товари складені шарами, виявлення пожежі відбувається із затримкою. Вода, яка подається на гасіння через спринклерні зрошувачі і розбризкується, важко проникає до осередку пожежі. Автори [15] проаналізувавши випадки пожеж стележних складів, що сталися в Кореї, дійшли висновку, що в результаті використання систем пожежної сигналізації для виявлення займання та автоматичних спринклерних систем, які встановлюються відповідно до положень Кореї, важко виявити та локалізувати пожежу на складі стележного типу.

У статті [16] автори представили експериментальні дослідження щодо пошуку оптимального методу виявлення пожежі на ранній стадії її розвитку на складі стележного типу. Дослідники на експериментальній конструкції стійкового типу з чотирма поверхнями заввишки 13,5 м і провели експерименти, які мали на меті виміряти потік тепла та диму в конструкції стійкового типу та час спрацювання пожежних сповіщувачів. Сповіщувачі, які використовувалися в експериментах, були тепловими, вимірювання швидкості підйому диму, проводилось фотоелектричним детектором диму, детектором диму у відібраних пробах повітря та детектором полум'я. Джерелами займання, що використовуються в експериментах, були полум'я н-гептан для визначення швидкості поширення тепла і полум'я і бавовна для визначення швидкості поширення диму. Теплові, димові пожежні сповіщувачі та сповіщувачі полум'я були встановлені на кожному рівні стележу. Результати досліджень показали, що теплові сповіщувачі слід встановлювати кожні 2 рівні, а димові пожежні сповіщувачі слід встановлювати кожні 4 рівні для раннього виявлення пожежі. Димові аспіраційні сповіщувачі можуть завчасно виявити пожежу, але є проблема у можливості хибного спрацювання. Теплові пожежні сповіщувачі не підходять для раннього виявлення пожежі на складі, а сповіщувач

полум'я не здатен виявити пожежу, якщо полум'я не видно, тому його потрібно встановити в комбінації з іншим сповіщувачем.

Автори у роботі [17] досліджували проблему виникнення великих матеріальних збитків від пожеж у складах із стележним зберіганням з вертикальним типом завантаження та високою щільністю пожежної навантаги.

У цьому дослідженні було проведено експеримент із запобігання вертикальному поширенню пожежі стележного складу з використанням горизонтального бар'єру та внутрішньостележних спринклерів. В результаті випробування горизонтальний бар'єр перешкоджав вертикальному поширенню полум'я протягом певного часу. Однак горизонтальний бар'єр не зміг повністю перешкодити поширенню полум'я. Поєднання горизонтального бар'єру та спринклера в стійці ефективно запобігало вертикальному поширенню вогню. Крім того, було продемонстровано ефект накопичення тепла через горизонтальний бар'єр, що сприяло ранній роботі спринклерів у стійці.

У результаті було підтверджено, що ефективність локалізації вертикального поширення вогню зросла приблизно на 30%, оскільки інтервал встановлення горизонтальних бар'єрів ставав ближчим або більш частим. Крім того, в результаті вимірювання температури верхньої та нижньої частин горизонтального бар'єру розподіл температури був приблизно в 2 - 4 рази вищим у випадку, коли бар'єр був встановлений, ніж у випадку, коли його не було.

У статті [18] авторами було пояснена структура та конфігурація багатошарової спринклерної системи, запропонованої на основі трирічного дослідження пожеж у стележному складі. Пожежа в стележній зоні складу характеризується дуже швидким вертикальним поширенням полум'я. Для локалізації пожежі стележного зберігання пожежний сповіщувач у стележі повинен виявляти пожежу на надранній стадії. Електричний клапан, який розміщений біля місця виникнення пожежі, відкривається системою керування. Після відкриття клапана вода подається на гасіння з спринклерної головки відкритого типу до каналу теплового конвекційного потоку, утвореного товарами та поверхню товарів на полиці стележа. У результаті швидкого виявлення та керування напрямом подачі води можна проводити пожежогасіння та зменшувати матеріальні втрати від пожежі при стележному зберіганні.

Автори [19] досліджують пожежну небезпеку та схеми удосконалення складу із стележним зберіганням з використанням автоматичного складування у зв'язку із зростанням попиту на склади з автоматизованими механізмами, які

встановлюються всередині складів, для забезпечення можливості вертикального завантаження продуктів або товарів для економії простору. Автори проаналізували пожежну небезпеку таких складів з точки зору обладнання складів різними протипожежними системами. В результаті аналізу автори встановили, що пожежна небезпека автоматизованих складів є надзвичайно високою через невизначені пожежні зони, великий об'єм, складність гасіння та виділення диму враховуючи особливості конструкції будівлі, а також через пожежну небезпеку і високу пожежну навантагу (продукцію) та можливе виникнення ефекту димової труби. Також автори у цьому дослідженні запропонували заходи для подолання цих проблем шляхом обов'язкового розрахунку пожежного навантаження.

Дослідження щодо вдосконалення критеріїв встановлення обладнання для виявлення та гасіння пожежі на складах стележного типу представлені у роботі [20]. На складі стележного типу, коли висота зберігання велика, а товари складені шарами, виявлення пожежі відбувається із затримкою, оскільки не ідентифікується тепло та дим, а вода, розпилена спринклерною системою, важко проникає до осередку пожежі. Крім того протипожежні системи, які встановлені відповідно до вимог положень Кореї, важко виявити та локалізувати пожежу на складі стележного типу. Враховуючи вищевказане автори в роботі аналізують випадки пожеж, які виникли в складах із стележним складуванням, що сталися в Кореї.

Кількість стележних складів швидко зростає у столичному регіоні завдяки ефективному та легкому зберіганню великих обсягів товарів. Однак, усередині цих стележних складів велика кількість горючих предметів, таких як дерево або пластик, зберігаються вертикально складеними на досить великих висотах, а оскільки предмети, що зберігаються, розташовані дуже близько один до одного, велика кількість тепла та диму утворюється під час процесу горіння у разі пожежі. Через велику кількість різноманітних горючих матеріалів пожежному сповіщувачу, встановленому на стелі, важко швидко виявити пожежу. Крім того, згідно з правилами, спринклер встановлюють на висоті від 4 до 6 м на стійці стележа, що ускладнює проникнення води до осередку займання і, як наслідок, – ефективне гасіння пожежі. Тому автори у дослідженні [20] порівнюють та переглядають вітчизняні та іноземні стандарти протипожежних засобів і пропонують заходи для їх покращення.

Поширення пожежі у великих виробничих і складських приміщеннях досліджується у статті [21]. Основна увага дослідників була зосереджена на поширенні вогню від початкової пожежі в

стележному сховищі до суміжної стійки без взаємодії системи пожежогасіння.

Випробування показують, що товщина матеріалу, який зберігається в стележах, має значний вплив на поведінку горіння. Як і ширина каналу проходження диму та висота стележа для зберігання. Ці ефекти також спостерігалися в попередніх дослідженнях, але були підтверджені у цих випробуваннях, які проводились на експериментальній установці. Місце виникнення займання впливає на розвиток пожежі та криву HRR (швидкість тепловиділення). Зокрема, на поширення полум'я впливає висота стелі складу. Визначена оптимальна відстань між товарами, що зберігаються, і стелею. Якщо відстань більша, тепловий вплив на товари зменшується. Якщо висота менша, умови горіння змінюються – знижується ефективність горіння. Теплове випромінювання впливає на час спрацьовування спринклерів. Ухил стелі має незначний вплив на роботу спринклерів. Існувала велика різниця між випробуваннями вільного горіння деревини на відкритому просторі та горінням дерев'яні у закритому приміщенні. Розмір корпусу вплинув на HRR, але відмінності зменшувалися, коли розмір корпусу збільшувався.

Дослідники зробили висновки, що відстань між штабелями, висота штабелів і вид горючої навантаги є важливим параметром для поширення вогню.

Враховуючи можливість зберігання великої кількості різноманітних вогнєнебезпечних матеріалів, таких як горючі рідини, газу, батареї та інші вибухонебезпечні матеріали з різними фізико-хімічними властивостями, в Україні, згідно з ДСТУ 8828:2019 «Пожежна безпека» (додаток Г), встановлено вимоги пожежної безпеки щодо сумісного зберігання речовин і матеріалів. Можливість такого зберігання визначають на підставі кількісного врахування показників пожежної небезпеки, токсичності, хімічної активності, а також однорідності засобів пожежогасіння. Речовини і матеріали можуть бути сумісними або несумісними один з одним під час зберігання. Несумісними вважають такі речовини і матеріали, які під час зберігання сукупно збільшують пожежну небезпеку кожного з розглянутих матеріалів і речовин окремо; спричиняють додаткові труднощі під час гасіння пожежі; посилюють екологічну небезпеку під час пожежі (у порівнянні з пожежею від окремих речовин і матеріалів, взятих у відповідній кількості); вступають в реакцію взаємодії один з одним з утворенням небезпечних речовин.

Автори у роботі [22] стверджують, що в складських приміщеннях важливо класифікувати поведінку товарів при горінні та класифікувати їх

відповідно до займистості матеріалу для раннього виявлення та гасіння пожежі. У вказаному дослідженні авторами запропонований підхід до класифікації товарів, який моделює ранню стадію великомасштабних складських пожеж шляхом поділу процесу горіння на окремі процеси тепло та масообміну. Два безрозмірних параметри використовуються для представлення фізичних явищ у великому масштабі: число масопередачі, яке безпосередньо включає властивості горючого матеріалу, утворення продуктів горіння, теплове випромінювання, що спостерігається у великому масштабі. Щоб полегшити моделювання, число масопередачі (або В-число) було отримано експериментально, використовуючи вимірювання втрати маси (швидкості горіння) у стендових випробуваннях. Використовували два види палива: гофрокартон і полістирол. Гофрокартон є горючим матеріалом який, як правило запалюється першим та підтримує поширення полум'я. Полістирол зазвичай використовується як найнебезпечніший продукт під час широкомасштабних вогневих випробувань. Безрозмірне число масопередачі потім було використано для моделювання висоти полум'я в стелажі на 6,1–9,1 м (20–30 футів) при вертикальному складуванні гофрокартонних коробок «С». При проведенні дослідження спостерігалася хороша узгодженість між моделлю та широкомасштабними експериментами на початкових етапах розвитку пожежі, а також включено порівняння з попередніми кореляціями для висоти полум'я в стійці.

У роботі [23] автори досліджують пожежну безпеку тютюнових складів. Такі склади характеризуються високою пожежною навантагою. Автори провели випробування на вогнестійкість на реальному складі тютюну та запропонували для гасіння імовірних пожеж в таких складах використовувати водяний дрібнодисперсний струмінь води.

Авторами у роботі [24] було проведено дослідження переваг протипожежних відсіків на хімічних складах та їх економічної ефективності по відношенню до інших заходів протипожежного захисту. Було розроблено імовірнісну модель, яка враховує поширення пожежі всередині відсіку, поширення вогню на сусідні відсіки та загальні наслідки пожежі яка враховувала залежність площі пожежі від часу. Також була зроблена проста детермінована оцінка наслідків вибуху на стінки відсіку в результаті розгерметизації металевих бочок, що містять рідке паливо. У дослідженні розглядалися три варіанти стін: залізобетонна стіна, блокова стіна та гіпсокартонна перегородка. Модель порівнює переваги, які надають ці варіанти стін, з перевагами, які надають інші заходи протипожежного захисту, такі як виявлення (ручне

та автоматичне), автоматичне або ручне гасіння пожежі (включаючи дії пожежних підрозділів), контроль розливу та розділення. Загальні витрати були визначені для заходів протипожежного захисту з використанням інформації, наданої постачальниками та інспекторами. Модель була запущена для вибраних проектів складів. З результатів дослідження автори зробили початкові висновки щодо вибору протипожежного захисту, а також виявлено невизначеності та слабкі сторони моделі.

Автори [25] досліджують фактори зниження ризику пожежі та стихійних лих на складі логістики бавовни на основі аналізу дерева подій і несправностей. Логістичні склади бавовни, як стверджують дослідники, невинно збільшувалися разом із розвитком суспільства. У статті, посилаючись на пожежі на складі логістики бавовни та фізико-хімічні властивості бавовни, проаналізовано пожежну небезпеку логістичного складу бавовни та визначено джерела небезпеки. На основі аналізу дерева подій і несправностей (EFTA) вивчався механізм катастрофи логістичних складів бавовни з метою отримання коефіцієнтів зменшення небезпеки. На основі аналізу запропоновано комплекс протипожежних заходів для логістичного складу бавовни. Результати показали, що важливо контролювати температуру нижче 343 K і вологість нижче 70% під час зберігання для запобігання тління. Відсутність простору між полицями є важливим фактором, що призводить до поширення вогню. У процесі гасіння пожежі важливим є водопостачання, тому перед створенням логістичного складу для зберігання бавовни необхідно передбачити влаштування водойми для потреб пожежогасіння.

У роботі [26] автори висвітлили дослідження пожежної безпеки логістичного складу. В процесі дослідження, на основі практичних даних розвитку пожежі, визначили, що пожежі в логістичних складах є пожежами середнього рівня, а програмне забезпечення FDS (Fire Dynamics Simulator) можна використовувати для моделювання розвитку пожежі. Результати досліджень показали, що температура диму, концентрація CO та видимість безпечні для людини протягом 884с. На матеріально-технічному складі, стверджують автори, слід застосовувати бетонну колону та сталеву конструкцію з вогнезахисним покриттям, а також забезпечити евакуаційний вихід повітряною завісою та вікнами загальною площею 5% від площі огорожувальної конструкції.

Дослідники у роботі [27] аналізують пожежну небезпеку при зберіганні текстильних матеріалів і текстильних виробів. Пожежі, що виникли в місцях зберігання текстильних матеріалів і текстильних виробів, особливо у відкритих місцях

зберігання, за даними авторів, займають відносно велику частку в пожежах, що виникли на складах. У роботі приведено аналіз ризику пожежі при зберіганні текстильних матеріалів і текстильних виробів, а також причинних факторів, який є теоретичною базою для ефективної діяльності з протипожежної безпеки.

У статті [28] автори досліджують динамічну систему управління ризиками для зони зберігання легкозаймистих, вибухонебезпечних та хімічних речовин. З метою покращення здатності управління надзвичайними ситуаціями для зони зберігання небезпечних хімічних речовин була запропонована структура технічної системи управління ризиками щодо легкозаймистих та вибухонебезпечних хімічних речовин. У поєднанні з динамічними змінами небезпечних джерел аналіз ризиків для зони зберігання небезпечних хімікатів проводився на основі моделі «метелика». Метод динамічного аналізу небезпек і система класифікації були створені на основі аналізу пар набору, оновлюючи результати в реальному часі та характеристиками аварій. Було запропоновано динамічну систему моніторингу безпеки з асновану на інтеграції мережі інтернет, інформаційної технології виявлення та зондування з геоінформаційною системою (ГІС). На основі бази даних була створена система підтримки прийняття рішень щодо небезпечних хімічних речовин у надзвичайних ситуаціях, включаючи їх термін зберігання, плани надзвичайних ситуацій, інформацію про ризик тощо. Використовуючи динамічну систему управління ризиками, система може ефективно досягати мети динамічного нагляду, ідентифікації ризиків, моніторингу в режимі реального часу, а також допомоги в прийнятті рішень щодо небезпечних хімічних речовин протягом усього життєвого циклу. Усі моделі складаються з структури динамічної системи управління ризиками, включаючи ідентифікацію, класифікацію, оцінку, нагляд та управління в надзвичайних ситуаціях.

У роботі [29] автор навів аналіз системи пожежної безпеки підприємств зі зберігання небезпечних хімічних речовин. Автор стверджує, що останніми роками на складах часто трапляються пожежі та вибухи, спричинені небезпечними хімічними речовинами, наприклад вибух у складському приміщенні розміром 4×22 м у Цзіньцзяні та вибух у порту Тяньцзінь у складі розміром 8×12 м. Тому, для подальшого покращення пожежної безпеки та усунення ризиків пожежної безпеки, слід створити досконалий метод оцінки ризику пожежі. Для оцінки пожежної безпеки складу небезпечних хімікатів у статті автором запропоновано застосовувати ідентифікацію джерела небезпеки, модель пожежі та вибуху,

аналітичний процес ієрархії та оцінку безпеки за певний інтервал часу.

Дослідження, які представлені у роботі [30], спрямовані на вирішення проблеми димовидалення та можливості роботи вентиляторів під час різних пожеж у великих приміщеннях та будівлях. Видалення диму дає можливість сприяти безпечній евакуації людей в разі пожежі, збереженню майна. Таким чином, контроль та видалення диму і димових газів з будівлі є життєвоважливим компонентом будь-якої схеми протипожежного захисту. Боротьба із задимленням та управління димовидаленням є двома основними способами вирішення проблеми. Метою управління димом є створення шару диму над рівнем перебування людей. Згідно з будівельними нормами та нормами в різних країнах, цього можна досягти шляхом встановлення на покрівлі будинків димових і теплових отворів, які відкриваються при спрацюванні плавких чутливих елементів, а також автоматично після виявлення пожежі за допомогою різних типів сповіщувачів, та шляхом вилучення диму за допомогою встановлених на покрівлі вентиляторів. У Швеції рекомендуються обидва типи димовидалення залежно від класу приміщення. Рекомендується також додаткова механічна витяжна вентиляція, що забезпечує від чотирьох до шестикратного обміну повітря на годину. Очікується, що така швидкість потоку повітря вилучатиме дим приблизно з тією ж швидкістю, що й утворюється. Очікується, що ця система підтримуватиме межу між шаром диму та зоною для дихання на достатній висоті над рівнем підлоги, щоб люди могли залишити приміщення.

Однак, можливість використання звичайних систем вентиляції під час розвитку пожежі вивчено недостатньо і лише починає займати належне місце як засіб протипожежного захисту. В роботі представлено результати досліджень системи протидимної вентиляції в поєднанні з використанням звичайних систем вентиляції та відкритих дверей в одному приміщенні. Дослідження базується на розрахунках, проведених за допомогою комп'ютерних програм PFS для статичного розрахунку потоку та SIMNON для динамічного моделювання пожежі.

У роботі [31] автори приводять опис розрахунку видалення диму на складах фармацевтичної промисловості. Протипожежний захист вказаного складу складається з автоматичного спринклера та внутрішнього протипожежного водопостачання. Крім того, передбачено вікна для видалення диму в місце, яке віддалене від місця пожежі. Вентиляційна система повинна забезпечувати уповільнення, припинення опускання шару диму, утвореного пожежею в будівлі, шляхом виведення диму назовні.

Крім того, вона повинна бути розробленою відповідно до стандарту шляхом розрахунку площі вентиляційного отвору, необхідної для досягнення масової швидкості потоку через вентиляційні отвори, що дорівнює масовій швидкості утворення диму. Крім того, система повинна обмежувати опускання шару диму до проектної висоти межі шару диму. Повинні бути передбачені повітрозабірники для подачі повітря до вентиляційних систем. Повітрозабірники, що складаються із жалюзі, дверей, заслінок, вікон, віконниць або інших затверджених отворів, повинні бути спроектовані та виготовлені для забезпечення проходження зовнішнього повітря в будівлю. Масові потоки диму, входу свіжого повітря та площі вікна, необхідні для випуску диму, будуть оцінені з припущенням, якщо склад є будівлею, яка має великий об'єм, де розмір пожежі постійний. Розрахунок видалення диму проводився згідно з ASHRAE 1999 та NFPA 2001, а також стандартом SNI 03-657-2001, а мінімальний поперечний переріз площі вікна для видалення диму становить приблизно 2,64 м². Автори порівняли результат розрахунку за стандартом з емпіричним методом, він становить 7,15 м².

У статті [32] авторами запропоновано заходи для забезпечення належного рівня безпеки працівників промислового складу. Основна увага приділялась оцінці ефективності системи димовидалення. Кількісний аналіз доступного безпечного часу виходу та необхідного безпечного часу виходу проводився з використанням як простого розрахунку, так і комп'ютерного моделювання. Дослідження включало аналіз багатьох сценаріїв пожежі, включаючи варіації проектних пожеж, умов вентиляції та кількості виходів.

В дослідженні застосовувалось комп'ютерне моделювання за допомогою якого прогнозувались розвиток пожежі та поширення диму у великому складі з пропорційно- великим вентиляційним отвором. У результаті моделювання автори виявили цікаві моделі руху диму. Результат дослідження продемонстрував прийнятність альтернативного проектного рішення за встановленим критерієм.

Відомо, що найкращий спосіб мінімізувати збиток від пожежі – виявити її якомога швидше, перш, ніж вона встигне поширитись. Тому, ряд робіт присвячено саме ранньому виявленню пожежі [19, 16, 20, 21].

Відеовиявлення пожежі, стверджують автори [33], є значним внеском в ефективність систем виявлення пожежі, особливо щодо пожеж у великих приміщеннях, таких як атріуми, тунелі, склади, оскільки традиційні системи виявлення пожежі виявилися неефективними у великих приміщеннях. Для розробки систем відеоспостереження пожежі, важливі просторові, спектральні та часові

показники ідентифікації джерела пожежі. У розробці систем відеовиявлення пожежі важливими напрямками дослідження є сегментація зображення полум'я, розпізнавання, відстеження та прогнозування. Для сегментації зображень полум'я можна використовувати багатопороговий алгоритм методу Оцу та метод аналізу розподілу Релея (модифікований алгоритм сегментації). Однак, модифікований алгоритм сегментації можна посилити, щоб отримати зображення пожежі, використовуючи оптимальні порогові значення. Після такої сегментації техніку центроїдного аналізу зображень пожежі в басейні можна використовувати для розпізнавання зображень пожежі в за допомогою алгоритму найближчого сусіда (NN). Модифікована сегментація та алгоритми NN вивчаються у цій статті.

Пожежні відеосповіщувачі найкращим чином підходять для захисту великих об'єктів і приміщень з високими стелями. Так в статті [34] розглядається можливість використання пожежних відеосповіщувачів для захисту авіаційних ангарів. Автори зазначають, що використання пожежних відеосповіщувачів є чудовою альтернативою традиційній системі пожежної сигналізації з пожежними сповіщувачами.

Алгоритми [35] виявлення загорання використовують різні методи для визначення характеристик полум'я та диму та можуть базуватися на спектральних, просторових або часових властивостях. В статті розроблено алгоритм автоматичного виявлення полум'я на зображенні на основі аналізу пікселів кольору полум'я та площі полум'я. Проаналізовано різні зображення, на яких є полум'я у колірній моделі RGB, і визначено середнє значення їх інтенсивності і середньоквадратичне відхилення. Експериментальні дослідження в програмному середовищі MATLAB показують працездатність розробленого алгоритму.

Невід'ємною умовою уникнення збитків від пожеж на складах або принаймні їх мінімізації, підкреслюють автори у роботі [36], є раннє виявлення пожежі за допомогою систем протипожежного захисту, а також своєчасна її локалізація. Від того, які пожежні сповіщувачі обрані для захисту відповідних приміщень і де вони встановлені, залежить час спрацювання всіх елементів систем протипожежного захисту при пожежі. На основі аналізу літературних джерел дослідники [36] стверджують, що на даний момент відсутній комплексний підхід до вибору оптимального розміщення елементів вказаних систем на складах. Крім того, недостатньо вивчено оптимальне розташування пожежних сповіщувачів у приміщенні з урахуванням типу пожежного навантаження. Автори досліджують

залежність часу спрацювання різних типів пожежних сповіщувачів від виду горючого матеріалу, а саме його масової швидкості вигорання, відстані та висоти розташування сповіщувачів від потенційного місця пожежі. У вказаній роботі описано процедуру проведення експериментального дослідження для визначення відповідної залежності для складів. Результати експериментів показали, що найбільш ефективними на складах є лінійні пожежні димові сповіщувачі та аспіраційні димові пожежні сповіщувачі. За результатами повнофакторного експерименту побудовано нелінійні емпіричні залежності для визначення часу спрацювання димових пожежних сповіщувачів від вищевказаних факторів. Отримані емпіричні залежності дають можливість підібрати пожежні сповіщувачі та оптимально розташувати їх у приміщенні. Середня похибка цих залежностей порівняно з експериментальними даними становить 6,9 %. Використання отриманих залежностей дає змогу зменшити час спрацювання пожежних сповіщувачів на 14 с порівняно з їх розташуванням, згідно з будівельними нормами.

Дослідники у роботі [37] стверджують, що параметри світла та колір полум'я допомагають виявити пожежу. Виявлення пожежі за допомогою кольорової інформації застосовують у багатьох областях. Метод на основі кольорової моделі, який використовується для виявлення пожежі, має багато переваг перед звичайними методами виявлення диму. Для покращення параметрів ефективності виявлення полум'я на основі живого відеопотоку автори пропонують ефективний метод виявлення пожежі на основі кольорової моделі. Кожен піксель перевіряється на наявність або відсутність пожежі за допомогою кольорних характеристик, а також аналізується періодична поведінка в областях пожежі. Можливі області пожежі виявляються за допомогою хроматичних та динамічних вимірювань.

У роботі [38] розглянуто потенціал штучного інтелекту (ШІ) для виявлення та розпізнавання пожеж і зменшення часу виявлення за допомогою виявлення об'єктів у потоці зображень. За останні шість років виявлення об'єктів зробило величезний стрибок у швидкості та точності, завдяки чому виявлення в реальному часі стало можливим. Для цієї мети дослідники зібрали та позначили відповідні дані з кількох загальнодоступних джерел, які були використані для навчання та оцінки кількох моделей на основі популярного детектора об'єктів «YOLOv4». Автори [38] співпрацюють з промисловим партнером, щоб реалізувати свої дослідження в умовах промислового складу, який має велику висоту. Недоліком традиційних сповіщувачів диму в цій установці є те, що дим повинен підніматися на достатню висоту. Моделі

штучного інтелекту, запропоновані в цьому дослідженні, зуміли перевершити ці сповіщувачі на значний проміжок часу, що могло б скоротити час виявлення пожежі допомогти мінімізувати наслідки від неї.

Автори [39] надають увагу використанню систем протипожежного захисту в приміщеннях складів. Автори розробили математичну модель і методику визначення оптимальної кількості засобів системи протипожежного захисту складських приміщень закритого типу, на основі яких можна визначити заходи із вдосконалення цієї системи. Суть розробленої методики полягає у визначенні необхідної кількості засобів протипожежного захисту, відповідно до стандартів, визначенні ймовірності відмови протипожежного захисту та визначенні оптимальної кількості засобів протипожежного захисту для забезпечення значення ймовірності відмови в допустимих межах. Критеріями оптимізації обрано прямі збитки від пожежі та витрати пожежно-рятувальних підрозділів на її гасіння. Вхідними даними при використанні математичної моделі є розрахункова кількість засобів протипожежного захисту відповідно до норм і стандартів.

Розроблена методика, яку пропонують автори [39] дає можливість прогнозувати ймовірність відмови протипожежної системи забезпечити пожежну безпеку об'єктів охорони та її наслідки для людей і матеріальних цінностей, що дуже важливо для забезпечення можливості швидкого реагування у разі виникнення пожежі. Також результатом застосування методики є оптимальна кількість засобів пожежогасіння на об'єкті, що забезпечує прийнятне значення ймовірності відмов. Ця методика застосована на прикладі існуючого логістичного складу, на якому змонтовані системи протипожежного захисту. Результати моделювання свідчать, що на об'єкті необхідно збільшити кількість пожежних сповіщувачів до 70 шт., пристроїв димовидалення – до 3 шт., вертикальних завіс – до 4 шт., обладнати аераційні лампи в кількості 4 шт.

У роботі [40] автори розглянули впровадження протипожежної безпеки на складі. Зокрема, було розраховано та обговорено різні важливі параметри, такі як коефіцієнт тертя труб, коефіцієнт k спринклера підвісного типу. Трубопроводи розраховувались з різними номінальними діаметрами отворів і довжиною труб для підтримки постійної швидкості потоку. Спринклери підвісного типу були встановлені на однаковій відстані, щоб охопити логістичну зону складу. Встановлено, що розроблена система забезпечує рівномірну щільність води зі швидкістю 24,39 мм/хв через спринклерну систему. Згідно з рекомендованим стандартом

Бюро індійських стандартів із будівництва та безпеки, для складу було розроблено та розраховано необхідну кількість мінімального коефіцієнта щільності протипожежного розриву складу. Ця спринклерна система здатна ліквідувати пожежу або мінімізувати збитки до приїзду пожежників.

Дослідники [41] за допомогою пристрою ADD (витратоміра), оснащеного імітатором пожежного шлейфу, експериментально вивчають фактичну витрату води для пожеж у складах стележного зберігання. Досліджувані змінні включали витрату води спринклерів (76-212 л/хв), потужність теплового випромінювання (0, 500, 1000, 1500 і 2000 кВт), відстань до стелі (3,05, 4,57 і 6,10 м) і місця займання (осередок пожежі) (по центру нижче одного спринклера та нижче чотирьох спринклерів). Відстань між спринклерами встановлювалась 3,05 м для всіх випробувань. Результати вимірювань свідчать про те, що фактична витрата води зменшилась при збільшенні відстані від стелі з 3,05 м до 6,10 м. Дані ADD були задовільно корельовані за допомогою двох параметрів. Один параметр відповідає відношенню розміру краплі, а інший – відношенню імпульсу бризок до імпульсу вогняного струменя. Продемонстровано, що ADD можна використовувати для інтерпретації ефективності стандартних спринклерів під час проведення великомасштабних пожежних випробувань складів із стележним зберіганням.

Автоматичні спринклерні системи, зазначають автори у роботі [42], є основною системою протипожежного захисту для складів і складських приміщень. Ефективність цієї стратегії була піддана сумніву на семінарах Національного фонду досліджень протипожежного захисту. Ці занепокоєння виникли через зростаючі проблеми, пов'язані з сучасними складськими приміщеннями, включаючи збільшення висоти та площі зберігання, використання автоматизованих систем зберігання (ASRS), обмеження в доступних запасах води та зміни в стратегіях пожежогасіння. Застосування пристроїв пожежної сигналізації, що використовуються для раннього попередження та оповіщення про пожежі, що виникають на складах, розглядається як складова сучасного протипожежного захисту складів.

Еколого-економічні ризики протипожежного захисту складів і резервуарних парків досліджено у роботі [43]. Зокрема, у статті розглядаються способи пожежогасіння складських приміщень, екологічні, економічні ризики їх застосування та шляхи мінімізації можливих впливів. Це пов'язано з тим, що вогнегасники, які використовуються, не є екологічно безпечними і завдають шкоди навколишньому середовищу і людині. Аналіз існуючих систем протипожежного захисту

резервуарів показав, що всі способи пожежогасіння мають недоліки і загалом є шкідливими для навколишнього середовища.

У роботі [44] автори представили дослідження часу спрацювання спринклерної системи в логістичному складі під впливом порожнистого перекриття стелажів. Галузь логістики швидко розвивалася, і тому з'явилася велика кількість логістичних складів, які використовують мезонінні стележні системи. У статті аналізується температура диму під впливом порожнистої панелі мезонінної стележної системи через процес поширення диму та оцінюється порожнистість 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% і 50%. Завдяки моделюванню FDS (Fire Dynamics Simulator) результати підтверджують, що разом із зменшенням порожнистості та збільшенням відстані температура диму поступово знижується. Крім того, існує функціональний зв'язок між температурою спрацювання автоматичної спринклерної системи та розміром порожнистості стележу. За результатами досліджень були зроблені такі висновки:

– під час пожежі на складі логістики температура димових газів на стелі знижується зі зменшенням порожнистості та відстані. Крім того, конструкція повинна забезпечувати розміщення розпилювальної головки безпосередньо над порожнистістю;

– у разі проектування джерела полум'я існує чіткий функціональний зв'язок між робочою температурою та швидкістю спрацювання спринклерної системи.

Висновки

1. Згідно з проведеними дослідженнями та стандартами для захисту логістичних складів рекомендуються заходи із покращення пожежної безпеки логістичних складів, а саме: організація зберігання товарів, що дає можливість запобігти утворенню перешкод для доступу зрошувачів до полум'я та забезпечити ефективність роботи систем пожежогасіння; проведення перевірок та вчасне обслуговування протипожежного обладнання для запобігання непередбачуваним несправностям в системах пожежогасіння; проведення навчання та тренувань працівників щодо правил пожежної безпеки та дій у разі виникнення пожежі; оснащення новітніми системами протипожежного захисту з урахуванням останніх наукових досліджень.

2. Ризики, пов'язані з виникненням пожеж на логістичних складах, демонструють потребу в дослідженні і розробці більш ефективних систем протипожежного захисту на основі новітніх технологій: системи виявлення загорання з використанням аспіраційних пожежних сповіщувачів, вмонтованих в стелажі інтелектуальних точкових пожежних сповіщувачів; систем пінного та водяного

пожежогасіння з особливим розташуванням зрошувачів, яке передбачає їх розміщення в центрі простору, утвореного матеріалами зберігання. Особлива увага приділяється використанню пожежних відеоспівіснувачів, які використовують алгоритми виявлення загорання використовуючи різні методи визначення характеристик полум'я та диму, базуючись на спектральних, просторових або часових властивостях.

3. Для забезпечення ефективного захисту логістичних складів за допомогою систем виявлення загорання з використанням аспіраційних пожежних співіснувачів та пожежних відеоспівіснувачів необхідно провести додаткові дослідження, які дозволять відповісти на питання щодо швидкості виявлення загорання, ймовірності помилкових спрацювань від різних завод, а також місця його встановлення. При використанні пожежних відеоспівіснувачів необхідно врахувати те, що в Україні відсутня нормативна база щодо їх застосування, а міжнародні нормативні документи не дають вичерпних вимог до впровадження пожежного відеоспівіснення для захисту об'єктів. Аналогічні дослідження необхідно провести до проектування і використання систем пожежогасіння, які дозволяють ефективно здійснювати гасіння пожеж.

Список літератури:

1. Sangamithra S. et al. Design and Implementation of PLC based water Curtain Nozzle Controller for Warehouse Application // 5th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC). – IEEE, 2021. P. 715-718. DOI:10.1109/ICCMC51019.2021.9418307.
2. Woon Hyung Kim, Eun-Gu Ham, Dong-Hun Seo. A improvement plan for fire fighting activity of rack-type warehouse based on case study and field interview. Journal of the Society of Disaster Information Vol.15, Issue 1,2019. P. 67-75. DOI: 10.15683/KOSDI.2019.03.31.67.
3. Szymonik Andrzej. Warehouse safety. Logistics and Transport, 2018. 38(2): P.101-112. DOI: 10.26411/83-1734-2015-2-38-11-18.
4. Long Ding, Faisal Khan, Jie Ji «Risk-based safety measure allocation to prevent and mitigate storage fire hazards». Process Safety and Environmental Protection 135 (2020): 282-293. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.01.008/>
5. Shaoyun Ren. «Assessment on Logistics Warehouse fire Risk based on Analytic Hierarchy Process». Procedia Engineering 45 (2012): P.59-63. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.08.121>.
6. О. І. Петренко, Д. О. Сичков, Управління складською діяльністю промислових підприємств на логістичних засадах. Ефективна економіка № 6, 2017, м. Київ
7. ДБН В.2.2-43:2021 Будівлі та споруди. Складські будівлі. Основні положення [Чинний з 01.09.2022]. Київ: Державне підприємство "Укрархбудінформ", 2022. 24 с.
8. Zhu Yuanzhang, Shan Tian Yun, Byung Kuk Ahn A Study on architectural countermeasures of maintenance aspect for the fire fighting activity in the sandwich panel warehouses. Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation. 2017. Vol. 17(6). P. 11-18. DOI:10.9798/KOSHAM.2017.17.6.11.
9. Kim, Hee-Kyu; Park, Sang-Hyun; Jung, Tae-Ho. A Study on the Alternatives for Fire Safety Management by Warehouse Fire Analysis. Proceedings of the Korea Institute of Fire Science and Engineering Conference, 2009. P.598-605.
10. Jong-Hoon Kim, W. Joung, S. Myoung, Keesin Jeong, Woon-Hyung Kim Design of Concentrated Sprinkler for Rack Storage //Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation. 2018. Vol. 18(4). P. 203-208.
11. Myoung, Sangyoub, and Keesin Jeong. Concentrated watering sprinkler system for rack-type warehouses. Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, 2018. Vol. 18(5). P. 105-111. DOI: /doi.org/10.9798/KOSHAM.2018.18.5.105.
12. Haukur Ingason. Plume flow in high rack storages. Fire safety journal. 2001. Vol. 36(5). P. 437-457. DOI: /doi.org/10.1016/S0379-7112(01)00007-8.
13. LeeNone Y. S. et al. A Study on the Optimal Design of a Sprinkler System for Rack-Type Automatic Warehouses According to the Pipe Design Methods. Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, 2018. T. 12. №. 2. P. 112-120. DOI: 10.12972/JKIAEBS.20180010.
14. Kung H. C. et al. Four-tier array rack storage fire tests with fast-response prototype sprinklers. Fire Safety Science, 1989. T. 2. P. 633-642. DOI:10.3801/IAFSS.FSS.2-633.
15. Choi KO, Choi DM A Study on Improvement of Installation Provision for Fire Detection and Suppression System in Rack-Type Warehouse. Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, 2018. T. 18. No. 4. P. 209-213. DOI: 10.9798/KOSHAM.2018.18.4.209
16. Choi K. O., Kim D. S., Hong S. H. An Experimental Study on the Optimum Installation of Fire Detector for Early Stage Fire Detecting in Rack-Type Warehouses. Journal of the Korean Society of Safety, 2017. T. 32. №. 2. P. 38-45. DOI:10.5281/zenodo.1340160.
17. Yeo I. H., Cho G. H. Application of Horizontal Barrier on a Rack to Reduce Fire Spread // Fire Science and Engineering, 2017. T. 31. №. 4. C. 71-79. DOI:10.14346/JKOSOS.2019.34.5.15.
18. Kim J. H. et al. Design of Concentrated Sprinkler for Rack Storage //Journal of the Korean

- Society of Hazard Mitigation, 2018. T. 18. №. 4. P. 203-208. DOI:10.9798/KOSHAM.2018.18.4.203.
19. Lee, Y.S., Ahn, Y.C., Nam, Y.J., You, D.K., Kwark, J.H. (2017). A Study on the fire hazard and improvement schemes of a Rack-type automatic warehouse, Journal of the Korean Society for Power System Engineering, 21(3). P. 19-29.
20. Ki-Ok Choi i Don-Mook Choi. «A Study on Improvement of Installation Provision for Fire Detection and Suppression System in Rack-Type Warehouse». Korean Society of Hazard Mitigation 18(4). P.209-213. DOI: 10.9798/KOSHAM.2018.18.4.209.
21. Anders Lönnermark, Haukur Ingason. Fire Spread in Large Industrial Premises and Warehouses // SP Swedish National Testing and Research Institute 2005. P -60.
22. Overholt, KJ et al. Warehouse commodity classification from fundamental principles. Part II: Flame heights and flame spread. Fire safety journal, 2011. T. 46. №. 6. P. 317-329. DOI: 10.1016/j.firesaf.2011.05.002.
23. Luo, Tinade, Jing Qiao, and Beihua Cong. The Application and Experiment of High-Pressure Water Mist Fire Extinguishing System in the Tobacco Industry. Proceedings of the Second International Conference on Mechatronics and Automatic Control. Springer International Publishing, 2015. DOI:10.1007/978-3-319-13707-0_133.
24. Tyldesley A., Rew P. J., Houlding R. C. Benefits of fire compartmentation in chemical warehouses. Process Safety and Environmental Protection, 2004. T. 82. №. 5. P. 331-340. DOI:10.1205/psep.82.5.331.44195.
25. Wen-hui Ju. Study on Fire Risk and Disaster Reducing Factors of Cotton Logistics Warehouse Based on Event and Fault Tree Analysis. Procedia Engineering, 2016. T. 13. №. 5. P. 418-426. DOI:10.1016/j.proeng.2016.01.150.
26. Wu Jian-qiang, Zhang Lei, Zhu Guo-qing Performance-based Evaluation on the Logistics Warehouse. Procedia Engineering, 2011. № 11. P. 522-528. DOI:10.1016/j.proeng.2011.04.691.
27. Jian-yun Ma Analysis on the Fire Risk Existing in the Storage of Textile Materials and Textile Goods. Procedia Engineering, 2014. № 71. P. 271-275. DOI:10.1016/j.proeng.2014.04.039.
28. Xuanya Liu, Jingjing Li , Xinwei Li Study of dynamic risk management system for flammable and explosive dangerous chemicals storage area. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017. №49. P. 983-988. DOI:10.1016/j.jlp.2017.02.004.
29. Cong Zhang. Analysis of Fire Safety System for Storage Enterprises of Dangerous Chemicals. Procedia Engineering, 2018. №211. P. 986-995. DOI:10.1016/j.proeng.2017.12.101.
30. Gordonova P. Smoke and fire gases venting in large industrial spaces and stores. Division of Building Services, Department of Building and Environmental Technology, Lund Institute of Technology, Lund University, 2004. Report relates.
31. Supriyono, Toto and Mulyajaya, Herry SMOKE RELEASE MANAGEMENT IN A WAREHOUSE. Annual Engineering Seminar 2011, 1 (1). P.57-C60. ISSN 978-602-98726-0-6.
32. Yaping He et al. Smoke venting and fire safety in an industrial warehouse. Fire Safety Journal, 2002. T. 37. №. 2. P. 191-215. DOI: 10.1016/S0379-7112(01)00045-5.
33. Wong AKK, Fong NK Experimental study of video fire detection and its applications. Procedia engineering, 2014. T. 71. P. 316-327. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.04.046.
34. Оношко І. А., Кушнір А. П., Вовк С. Я., Кобко В. А. Аналіз можливостей підвищення протипожежного захисту авіаційних ангарів шляхом вдосконалення високотехнологічних систем виявлення пожежі. *Пожежна безпека: Збірник наукових праць*. Львів: ЛДУ БЖД, 2023. №43. С. 99-112. DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.43.2023.12>.
35. Кушнір А.П., Копчак Б.Л. Створення алгоритму автоматичного виявлення полум'я на основі комп'ютерного зору з використанням програмного середовища MATLAB. *Пожежна безпека: Збірник наукових праць*. Львів, ЛДУ БЖД, 2020. №36. С. 49-58. DOI: 10.32447/20786662.36.2020.05
36. Sharyy V., Pasnak I., Renkas A. Optimizing Process of Fire Detection in Warehouses Fire Detectors //Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2022. T. 2. №. 10. P. 116. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.254620.
37. Hatekar A. et al. Fire detection on a surveillance system using Image processing. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). 2017. T. 6. No. 05. DOI: 10.17577/IJERTV6IS050094.
38. Otto Zell et al. Image-Based Fire Detection in Industrial Environments with YOLOv4. arXiv preprint arXiv:2212.04786. 2022. DOI:10.48550/arXiv.2212.04786
39. Hulida, Edward, et al. Engineering method for determining rational fire protection parameters of warehouses. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2020. T. 2. №. 10. P. 104. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.201819.
40. Deepak Chhabra Implementation of Fire Fighting and Safety in Warehouse. International Journal of Research and Development in Engineering, Science and Management, 2016. 3. №. 7. P. 193-207.
41. Chan T. S., Kung H. C. Comparison of actual delivered density and fire suppression effectiveness of

standard and conventional sprinklers in rack-storage fires. *Fire Safety Science*, 2003. T. 7. P. 445-456.

DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.7- 445.

42. Joshua Dinaburg, Daniel T. Gottuk. Fire detection in warehouse facilities. Springer New York, 2012. P. 1-59. DOI: 10.1007/978-1-4614-8115-7_1

43. Evgeniy Degaev et al. Ecological and Economic Risks of Fire Protection of Warehouses and Tank Parks. *MATEC Web of Conferences*. 251. EDP Sciences, 2018.

DOI: 10.1051/mateconf/201825106013.

44. Yaxin Tan et al. Study on the response of sprinkler system in logistics warehouse under the influence of the hollow floorboard. *Case Studies in Thermal Engineering* 14, 2019: 100427. DOI:10.1016/j.csite.2019.100427.

References

1. Sangamithra, S., Sakitha, S., Rajasree, R., & Titus, T. J. (2021, April). Design and Implementation of PLC based water Curtain Nozzle Controller for Warehouse Application. In 2021 5th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC) (pp. 715-718). IEEE DOI:10.1109/ICCMC51019.2021.9418307.

2. Kim, W. H., Seo, D. H., & Ham, E. G. (2019). A improvement plan for fire fighting activity of rack-type warehouse based on case study and field interview. *Journal of the Society of Disaster Information*, 15(1), 67-75.. DOI: 10.15683/KOSDI.2019.03.31.67.

3. Szymonik, A. (2018). Warehouse safety. *Logistics and Transport*, 38(2), 101-112. DOI: 10.26411/83-1734-2015-2-38-11-18.

4. Ding, L., Khan, F., & Ji, J. (2020). Risk-based safety measure allocation to prevent and mitigate storage fire hazards. *Process safety and environmental protection*, 135, 282-293. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.01.008>.

5. Ren, S. (2012). Assessment on logistics warehouse fire risk based on analytic hierarchy process. *Procedia Engineering*, 45, 59-63. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.08.121>.

6. Petrenko O.I., Sychkov D.O. (2017) Upravlinnya skladskoy diyalnisty promyslovyh pidpryemstv na logistychnykh zasadah. Management of warehouse activity of industrial enterprises on a logistic basis. Efficient economy. (6).

7. Budivli ta sporudy. Skladsky budivli. Osnovni polozennya. Buildings and structures. Warehouse buildings. Substantive provisions (2021) DBN B.2.2-43:2021 from 1th september 2022. Kyiv: State Enterprise Ukrarhbudininform, [in Ukrainian].

8. 주환장, 상천윤, & 병국안. (2017). A Study on architectural countermeasures of maintenance aspect for the fire fighting activity in the sandwich panel warehouses. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 17(6), 11-18.

DOI:10.9798/KOSHAM.2017.17.6.11.

9. Kim, H. K., Park, S. H., & Jung, T. H. (2009). A study on the alternatives for fire safety management by warehouse fire analysis. In *Proceedings of the Korea Institute of Fire Science and Engineering Conference* (pp. 598-605). Korean Institute of Fire Science and Engineering.

10. Kim, J. H., Joung, W. I., Myoung, S. Y., Jeong, K., & Kim, W. H. (2018). Design of Concentrated Sprinkler for Rack Storage. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 18(4), 203-208.

11. Myoung, S., & Jeong, K. (2018). Concentrated watering sprinkler system for rack-type warehouses. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 18(5), 105-111.

DOI: /doi.org/10.9798/KOSHAM.2018.18.5.105.

12. Ingason, H. (2001). Plume flow in high rack storages. *Fire safety journal*, 36(5), 437-457. DOI:/doi.org/10.1016/S0379-7112(01)00007-8.

13. Lee, Y. S., Kwark, J. H., Kim, H. S., You, D. K., & Ahn, Y. C. (2018). A Study on the Optimal Design of a Sprinkler System for Rack-Type Automatic Warehouses According to the Pipe Design Methods. *Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*, 12(2), 112-120. DOI:10.12972/JKIAEBS.20180010.

14. Kung, H. C., Yu, H. Z., Brown, W. R., & Vincent, B. G. (1989). Four-tier array rack storage fire tests with fast-response prototype sprinklers. *Fire Safety Science*, 2, 633-642.

DOI:10.3801/IAFSS.FSS.2-633.

15. Choi, K. O., & Choi, D. M. (2018). A Study on Improvement of Installation Provision for Fire Detection and Suppression System in Rack-Type Warehouse. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 18(4), 209-213.

DOI:10.9798/KOSHAM.2018.18.4.209

16. Choi, K. O., Kim, D. S., & Hong, S. H. (2017). An Experimental Study on the Optimum Installation of Fire Detector for Early Stage Fire Detecting in Rack-Type Warehouses. *Journal of the Korean Society of Safety*, 32(2), 38-45.

DOI:10.5281/zenodo.1340160.

17. Yeo, I. H., & Cho, G. H. (2017). Application of Horizontal Barrier on a Rack to Reduce Fire Spread. *Fire Science and Engineering*, 31(4), 71-79. DOI:10.14346/JKOSOS.2019.34.5.15.

18. Kim, J. H., Joung, W. I., Myoung, S. Y., Jeong, K., & Kim, W. H. (2018). Design of Concentrated Sprinkler for Rack Storage. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 18(4), 203-208. DOI:10.9798/KOSHAM.2018.18.4.203.

19. Lee, Y. S., Ahn, Y. C., Nam, Y. J., You, D. K., & Kwark, J. H. (2017). A Study on the fire hazard and impro-vement schemes of a Rack-type automatic ware-house. *Journal of Power System Engineering*, 21(3), 19-29.

20. Choi, K. O., & Choi, D. M. (2018). A Study on Improvement of Installation Provision for Fire Detection and Suppression System in Rack-Type Warehouse. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 18(4), 209-213. DOI:10.9798/KOSHAM.2018.18.4.209.
21. Lönnermark, A., & Ingason, H. (2005). *Fire Spread in Large Industrial Premises and Warehouse*.
22. Overholt, K. J., Gollner, M. J., Perricone, J., Rangwala, A. S., & Williams, F. A. (2011). Warehouse commodity classification from fundamental principles. Part II: Flame heights and flame spread. *Fire Safety Journal*, 46(6), 317-329. DOI: 10.1016/j.firesaf.2011.05.002.
23. Luo, T., Qiao, J., & Cong, B. (2015). The Application and Experiment of High-Pressure Water Mist Fire Extinguishing System in the Tobacco Industry. In *Proceedings of the Second International Conference on Mechatronics and Automatic Control* (pp. 1197-1207). Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-319-13707-0 133.
24. Tyldesley, A., Rew, P. J., & Houlding, R. C. (2004). Benefits of fire compartmentation in chemical warehouses. *Process Safety and Environmental Protection*, 82(5), 331-340. DOI: 10.1205/psep.82.5.331.44195.
25. Ju, W. H. (2016). Study on fire risk and disaster reducing factors of cotton logistics warehouse based on event and fault tree analysis. *Procedia Engineering*, 135, 418-426. DOI:10.1016/j.proeng.2016.01.150.
26. Jian-qiang, W., Lei, Z., & Guo-qing, Z. (2011). Performance-based evaluation on the logistics warehouse. *Procedia Engineering*, 11, 522-528. DOI:10.1016/j.proeng.2011.04.691.
27. Ma, J. Y. (2014). Analysis on the fire risk existing in the storage of textile materials and textile goods. *Procedia engineering*, 71, 271-275. DOI:10.1016/j.proeng.2014.04.039.
28. Liu, X., Li, J., & Li, X. (2017). Study of dynamic risk management system for flammable and explosive dangerous chemicals storage area. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 49, 983-988. DOI:10.1016/j.jlp.2017.02.004.
29. Zhang, C. (2018). *Analysis of fire safety system for storage enterprises of dangerous chemicals*. *Procedia engineering*, 211, 986-995. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.101.
30. Gordonova, P. (2004). Smoke and Fire Gases Venting in Large Industrial Spaces and Stores.
31. Supriyono, T., & Mulyajaya, H. (2011). Smoke Release Management in A Warehouse. In *Annual Engineering Seminar 2011* (Vol. 1, No. 1, pp. C 57-C60). Fakultas Teknik UGM.
32. He, Y., Wang, J., Wu, Z., Hu, L., Xiong, Y., & Fan, W. (2002). Smoke venting and fire safety in an industrial warehouse. *Fire Safety Journal*, 37(2), 191-215. DOI: 10.1016/S0379-7112(01)00045-5.
33. Wong, A. K., & Fong, N. K. (2014). Experimental study of video fire detection and its applications. *Procedia engineering*, 71, 316-327. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.04.046.
34. Onoshko I.A., Kushnir A.P., Vovk S.Y., Kobko V.A. (2023) Analysis of the possibilities of increasing fire protection of aircraft hangars by improving high-tech fire detection systems. *Fire safety: Collection of scientific papers*. 43. 99-112. DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.43.2023.12>.
35. Kushnir A.P., Kopchak B.L. (2020) Creation of an automatic flame detection algorithm based on computer vision using the MATLAB software environment. *Fire safety: Collection of scientific papers*. 36. 49-58. DOI:10.32447/20786662.36.2020.05.
36. Sharyy V., Pasnak I., Renkas A. (2022) Optimizing Process of Fire Detection in Warehouses Fire Detectors //Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 10. 116. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.254620.
37. Hatekar, A., Manwani, S., Patil, G., & Parekh, A. (2017). Fire detection on a surveillance system using Image processing. *International Journal of Engineering Research & Technology (ijERT)*, 6(05). DOI: 10.17577/IJERTV6IS050094.
38. Zell, O., Pålsson, J., Hernandez-Diaz, K., Alonso-Fernandez, F., & Nilsson, F. (2022). Image-Based Fire Detection in Industrial Environments with YOLOv4. *arXiv preprint arXiv: 2212.04786*. DOI:10.48550/arXiv.2212.04786.
39. Hulida, E., Pasnak, I., Renkas, A., & Sharyy, V. (2020). Engineering method for determining rational fire protection parameters of warehouses. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(10), 104. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.201819.
40. Kumar, N., & Chhabra, D. (2016). Implementation of fire fighting and safety in warehouse. *International Journal of R&D in Engineering, Science and Management*, 3(7), 193-207.
41. Chan, T. S., & Kung, H. C. (2003). Comparison of actual delivered density and fire suppression effectiveness of standard and conventional sprinklers in rack-storage fires. *Fire Safety Science*, 7, 445-456. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.7- 445.
42. Dinaburg, J., Gottuk, D. T., Dinaburg, J., & Gottuk, D. T. (2012). *Fire detection in warehouse facilities* (pp. 1-59). Springer New York.

DOI: 10.1007/978-1-4614-8115-7_1

43. Degaev, E., Orlov, A., El Haddad, P., & Pleshivtsev, A. (2018). Ecological and Economic Risks of Fire Protection of Warehouses and Tank Parks. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 251, p. 06013). EDP Sciences.

DOI:10.1051/matecconf/201825106013.

44. Tan, Y., Li, J., Li, Y., & Huang, Y. (2019). Study on the response of sprinkler system in logistics warehouse under the influence of the hollow floorboard. *Case Studies in Thermal Engineering*, 14, 100427. DOI:10.1016/j.csite.2019.100427.

© О. В. Шаповалов, С. Я. Вовк, Н. О. Ференц
І. А. Оношко, Ю. В. Кіндрацький, 2024.

Оглядова стаття.

Надійшла до редакції 01.04.2024.

Прийнято до публікації 12.06.2024.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

АДОЛЬФ Іван Іванович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, ад'юнкт денної форми навчання докторантури-ад'юнктури, adolfov@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9132-673X>.

БАЛЛО Ярослав В'ячеславович, Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, заступник начальника відділу нормативно-технічного забезпечення науково-дослідного центру протипожежного захисту ІДУ НД ЦЗ, кандидат технічних наук, старший дослідник, 2801397@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9044-1293>.

ВЕСЕЛИВСЬКИЙ Роман Богданович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, докторант докторантури-ад'юнктури, кандидат технічних наук, доцент, roman_veselivskuy@yahoo.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3266-578X>.

ВОВК Сергій Ярославович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, докторант докторантури-ад'юнктури, кандидат технічних наук, доцент, sergiy_vovk@ukr.net, 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, voytovych.dmt@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2280-5585>.

ГАВРИЛЮК Андрій Федорович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, докторант докторантури-ад'юнктури, кандидат технічних наук, доцент gavrilyk3@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8727-9950>.

КАГІТІН Олександр Іванович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, аспірант денної форми навчання докторантури-ад'юнктури, kagitino@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2482-8422>.

КАРВАЦЬКА Марія Ярославівна, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, викладач кафедри фізики та хімії горіння, mkarvatska91@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2659-2724>.

КІНДРАЦЬКИЙ Юрій Володимирович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, аспірант докторантури-ад'юнктури, y.kindratskyj@ukr.net.

КОВАЛИШИН Богдан Михайлович, Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, начальник відділу персоналу ІДУ НД ЦЗ, kovalyshyn2024@ukr.net, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6433-8826>.

КОВАЛИШИН Василь Васильович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, професор кафедри цивільного захисту та протимінної діяльності, доктор технічних наук, професор, kovalyshyn.v@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5463-0230>.

КОВАЛИШИН Володимир Васильович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, доцент кафедри ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, кандидат технічних наук, vkovalushun1106@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3739-8668>.

ЛАВРЕНЮК Олена Іванівна, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, доцент кафедри фізики та хімії горіння, доктор технічних наук, доцент, olaw@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4509-2896>.

ЛАЗАРЕНКО Олександр Вікторович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, професор кафедри пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт, кандидат технічних наук, доцент, o.lazarenko@ldubgd.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0500-0598>.

ЛОЗИНСЬКИЙ Роман Якович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, професор кафедри фізики та хімії горіння, кандидат технічних наук, доцент, lozynskiy_r@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7292-711X>.

ЛУЩ Василь Іванович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, заступник начальника кафедри пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт, кандидат технічних наук, доцент, v.lushch@ldubgd.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5931-3181>.

МАРИЧ Володимир Михайлович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, старший викладач кафедри промислової безпеки та охорони праці, кандидат технічних наук, доцент, marychvolodj@ukr.net, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7051-4494>.

МИХАЛІЧКО Борис Миронович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, завідувач кафедри фізики та хімії горіння, доктор хімічних наук, професор, mykhalitchko@email.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5583-9992>.

НІЖНИК Вадим Васильович, Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, начальник науково-дослідного центру протипожежного захисту ІДУ НД ЦЗ, доктор технічних наук, професор, nignyk@ukr.net, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3370-9027>.

ОНОШКО Інна Анатоліївна, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, старший викладач кафедри наглядово-профілактичної діяльності та пожежної автоматики, i.onoshko@ldubgd.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5793-1680>.

ПАСТУХОВ Павло Васильович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, науковий співробітник науково-дослідної лабораторії пожежної безпеки кандидат технічних наук, pastuhovp@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3140-1101>.

РЕНКАС Артур Андрійович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, доцент кафедри експлуатації транспортних засобів та пожежно-рятувальної техніки, кандидат технічних наук, доцент, arthur.rencas@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5518-3508>.

СКОРОБАГАТЬКО Тарас Миколайович, Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, заступник начальника кафедри профілактики пожеж та безпеки життєдіяльності населення, кандидат технічних наук, foam2000@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5651-1975>.

СЛУЦЬКА Оксана Михайлівна, Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, начальник сектору техногенної безпеки Науково-дослідного центру цивільного захисту, кандидат технічних наук, sl_oksi@ukr.net, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1723-8181>.

СТИЛИК Ігор Геннадійович, Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, начальник сектору метрології ІДУ НД ЦЗ, igor_stilik@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8474-2014>.

СУКАЧ Роман Юрійович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, доцент кафедри пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт, кандидат технічних наук, доцент, sukach.r@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4174-9213>.

ТОВАРЯНСЬКИЙ Володимир Ігорович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, доцент кафедри експлуатації транспортних засобів та пожежно-рятувальної техніки, кандидат технічних наук, доцент, vi_tovarianskyi@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4484-8164>.

ФЕРЕНЦ Надія Олександрівна, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, доцент кафедри наглядово-профілактичної діяльності та пожежної автоматики, кандидат технічних наук, доцент, ferentsn@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3139-0921>.

ЧЕКРИГІН Олександр Миколайович, Одеський державний університет внутрішніх справ, старший викладач кафедри конституційного та міжнародного права, кандидат юридичних наук, chekriginaleks@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4921-3348>.

ШАПОВАЛОВ Олег Валерійович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, старший викладач кафедри наглядово-профілактичної діяльності та пожежної автоматики, кандидат технічних наук, o1972@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8444-2006>.

ШНАЛЬ Тарас Миколайович, Національний університет "Львівська політехніка", професор кафедри будівельних конструкцій та мостів, доктор технічних наук, професор, taras.m.shnal@lpnu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4226-9513>.

ЯКОВЧУК Роман Святославович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, начальник кафедри цивільного захисту та протимінної діяльності, доктор технічних наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5523-5569>.