



# НАУКОВИЙ ВІСНИК: Цивільний захист та пожежна безпека

## № 2 (14), 2022

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

ISSN 2518-1777

### Редакційна колегія:

головний редактор –  
голова редколегії  
д-р техн. наук

**Поздєєв С.В.**

заступник  
головного редактора  
канд. техн. наук

**Коваленко В.В.**

відповідальний секретар  
канд. техн. наук

**Огурцов С.Ю.**

д-р техн. наук  
д-р техн. наук  
д-р техн. наук  
канд. техн. наук  
канд. техн. наук  
канд. техн. наук  
канд. техн. наук  
канд. техн. наук  
канд. техн. наук

**Тютюнник В.В.**  
**Цапко Ю.В.**  
**Ніжник В.В.**  
**Лавренюк О.І.**  
**Лоїк В.Б.**  
**Кропивницький В.С.**  
**Новак С.В.**  
**Пазен О.Ю.**  
**Паснак І.В.**

канд. техн. наук  
канд. хім. наук  
PhDEng.

**Сізіков О.О.**  
**Ліхнівський Р.В.**  
**Врублевський Д.**

PhDEng.

**Самберг А.**

Літературні  
редактори:

**Помазанова Т.І.**  
(укр. мова)  
**Івашина Н.О.**  
(англ. мова)

Випусковий редактор

**Борисова А.С.**

### Адреса редакції:

04074, м. Київ, вул. Вишгородська, 21

#### Телефони:

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

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

e-mail: niv1966@ukr.net

Заснований у 2016 році  
Виходить 2 рази на рік

Засновник

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту (ІДУ НД ЦЗ)

Видавець

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту (ІДУ НД ЦЗ)

Журнал зареєстровано Міністерством юстиції України  
Свідоцтво від 20.07.2020  
серія КВ № 24507-14447 ПР

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

261 «Пожежна безпека»

263 «Цивільний захист»

Наказ Міністерства освіти і науки України від 02.07.2020 № 886

У разі передрукування матеріалів письмовий дозвіл ІДУ НД ЦЗ є обов'язковим

Рекомендовано до видання рішенням

Вченої ради ІДУ НД ЦЗ

Протокол від 30. 11. 2022 № 12

Ідентифікатор випуску DOI:

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2>

Підписано до друку 30. 11. 2022

Формат 60 × 84/8

Наклад 50 прим.

**ЗМІСТ**

**С. Новак, О. Добростан, М. Пустовий**  
Вплив температурного режиму пожежі на необхідну мінімальну товщину вогнезахисних покриттів для сталевих конструкцій

5

**Я. Балло**  
Створення експериментального випробувального стенду для досліджень обмеження поширення пожежі фасадами будівель

21

**Є. Кириченко, В. Гвоздь, О. Кириченко, О. Дядюшенко**  
Попередження передчасного спрацьовування піротехнічних виробів на основі сумішей з порошків магнію, алюмінію та оксидів металів в умовах зовнішніх термічних дій

35

**В. Коваленко, О. Добростан, О. Тимошенко, А. Борисова**  
Удосконалення методу випробувань з визначення вогнезахисної здатності вогнезахисних засобів

44

**В. Бенедюк, І. Стилик, О. Тимошенко, Р. Ліхнівський, А. Онищук, В. Присяжнюк**  
Результати лабораторних досліджень екранувальної здатності водяних завіс від проникнення небезпечних факторів пожежі

52

**Т. Агазаде, В. Тютюник, Л. Черногор, О. Тютюник**  
Особливості підтримання ухвалення антикризових рішень в умовах виникнення геофізичних надзвичайних ситуацій

65

**Д. Добряк, В. Ніжник, О. Нікулін, Н. Кравченко, О. Крикун**  
Визначення необхідної площі легкоскридних конструкцій

80

**А. Ковальов, Р. Пурденко, Ю. Отрош, В. Томенко, Н. Рашкевич, С. Юрченко**  
Моделювання нестационарного прогріву вогнезахисених залізобетонних колон

87

**CONTENTS**

**S. Novak, O. Dobrostan, M. Pustovyi**  
Influence of fire temperature regime on the required minimal thicknesses of fire-retardant coatings for steel members

**Ya. Ballo**  
Creation of an experimental test bench in the framework of fire spread limitations researched the builder on the facades

**Ie. Kyrychenko, V. Hvozdz, O. Kyrychenko, O. Diadiushenko**  
Prevention of previous operation of charges of pyrotechnical products based on mixtures of magnesium, aluminum powder and metal waste in the conditions of external thermal actions

**V. Kovalenko, O. Dobrostan, O. Tymoshenko, A. Borysova**  
Improvement of the test method for determining the fire protection capacity of fire protection equipment

**V. Benediuk, I. Stylyk, O. Tymoshenko, R. Lihniiovskii, A. Onyshcuk, V. Prisyazhnyuk**  
Results of laboratory research of shielding ability of water curtain from penetration of dangerous factors of fire

**T. Agazade, V. Tiutiunyk, L. Chernogor, O. Tiutiunyk**  
Features of supporting the adoption of anti-crisis decisions in the context of geophysical emergencies

**D. Dobriak, V. Nizhnyk, O. Nikulin, N. Kravchenko, O. Krykun**  
Regarding the determination of the necessary area of easy-dropped construction

**A. Kovalov, R. Purdenko, Yu. Otrosh, V. Tomenko, N. Rashkevich, S. Yurchenko**  
Simulation of unstationary heating of fireproof reinforced concrete columns

- В. Ковалишин, О. Доценко, О. Хлевной, В. Дивень**  
Дослідження евакуації людей різних груп мобільності з торговельно-розважального центру **99**
- В. Стрілець, І. Соловійов, О. Бляшенко В. Серватюк, А. Пруський**  
Методика обґрунтування оперативно-технічних рекомендацій щодо скорочення часу підводного розмінування водолазами-саперами Державної служби України з надзвичайних ситуацій **108**
- А. Кодрик, О. Тітенко, А. Борисов, О. Мороз, О. Тимошенко, І. Стилик**  
Можливості використання полімерних гелевих розчинів при гасіння сміттєзвалищ та полігонів твердих побутових відходів **122**
- Л. Несенюк, О. Савченко, В. Ніжник, О. Нікулін**  
Методи оцінювання ефективності функціонування систем протипожежного захисту **134**
- І. Несен**  
Дослідження поведінки залізобетонного сходового маршу в умовах теплового впливу пожежі **143**
- V. Kovalyshyn, O. Dotsenko, O. Khlevnoy V. Dyven**  
Research of the evacuation of people of different mobility groups from a shopping and entertainment center
- V. Strelets, I. Soloviov, O. Blyashenko, V. Servatyuk, A. Pruskyi**  
Methodology for substantiating operational and technical recommendations on reducing the time of underwater demining by divers-sappers of the State Emergency Service of Ukraine
- A. Kodryk, O. Titenko, A. Borysov, O. Moroz, O. Tymoshenko, I. Stylyk**  
Possibilities of using polymer gel solutions while extinguishing landfills and solid household waste landfills
- L. Nesenyuk, O. Savchenko, V. Nizhnyk, O. Nikulin**  
Methods of assessing the efficiency of functioning of fire protection systems
- I. Nesen**  
Research of the behavior of a reinforced concrete staircase in the conditions of the thermal influence of fire

УДК 614.841.45

## ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ ПОЖЕЖІ НА НЕОБХІДНУ МІНІМАЛЬНУ ТОВЩИНУ ВОГНЕЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2.5-20>

Новак С. В.<sup>1\*</sup>, ORCID iD 0000-0001-7087-318X  
Добростан О. В.<sup>1</sup>, ORCID iD 0000-0001-8908-0729  
Пустовий М. М.<sup>2</sup>, ORCID iD 0000-0003-1434-4296  
\*E-mail: novak.s.fire@gmail.com

<sup>1</sup>Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Україна

<sup>2</sup>Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, Україна

### ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 11.10.2022

Пройшла рецензування: 14.10.2022

### КЛЮЧОВІ СЛОВА:

вогнезахисне покриття, коефіцієнт теплопровідності, критична температура сталі, необхідна мінімальна товщина, номінальний температурний режим, сталева конструкція, теплофізичні властивості

### АНОТАЦІЯ

Через брак даних щодо співвідношення між значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисних покриттів сталевих конструкцій, отриманими для умов вогневого впливу за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожежі, та значеннями цієї товщини для стандартного температурного режиму пожежі відбувається обмеження сфери застосування таких вогнезахисних матеріалів. У проведеному дослідженні ставилося за мету виявлення впливу цих номінальних температурних режимів пожежі на необхідну мінімальну товщину вогнезахисного покриття для таких несучих сталевих конструкцій, як колони і балки, для широких діапазонів змінювання теплофізичних властивостей застосовного вогнезахисного матеріалу, критичної температури сталі, коефіцієнта поперечного перерізу і проміжку часу збереженості вогнестійкості сталеві конструкції. За розрахунковим методом, який ґрунтується на розв'язуванні прямої одномірної задачі теплопровідності, визначено дані щодо необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття для температурних режимів вуглеводневої та зовнішньої пожежі і дані щодо різниці між цими отриманими значеннями зі значеннями такої товщини, встановленими для стандартного температурного режиму. З'ясовано, що різниця між значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття для сталевих конструкцій, отриманими для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі, і значеннями цієї товщини, визначеними за стандартного температурного режиму, має позитивні значення (від 5,74% до 214%), водночас для умов вогневого впливу за температурного режиму зовнішньої пожежі – від'ємні (від -7,52% до -64,7%). Ця різниця як для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі, так і для умов вогневого впливу за температурного режиму зовнішньої пожежі, з підвищенням коефіцієнта теплопровідності застосовного вогнезахисного матеріалу, коефіцієнта поперечного перерізу і зі зменшенням критичної температури сталі зменшується. Закономірним є те, що з підвищенням проміжку часу збереженості вогнестійкості сталеві конструкції для температурного режиму вуглеводневої пожежі різниця між товщинами зменшується, а для температурного режиму зовнішньої пожежі – збільшується (за модулем).

**Постановка проблеми.** Згідно з положеннями Будівельного Єврокоду № 3 [1] для забезпечення вогнестійкості несучих сталевих конструкцій, таких як колони і балки (далі – сталевих конструкцій), товщина їхнього вогнезахисту має бути такою, щоб в умовах вогневого впливу температура цих конструкцій  $\theta_a$  не перевищувала критичного значення  $\theta_{a,cr}$ . Для оцінювання цієї товщини застосовують методи випробування [2; 3], які ґрунтуються на сценарії умовної пожежі та вогневому впливі за стандартного температурного режиму. За цими методами визначають значення мінімальної товщини вогнезахисного покриття  $d_{p,min}$ , необхідні для забезпечення вогнестійкості сталевих конструкцій протягом нормованих проміжків часу вогневого впливу  $t_{fr}$  за стандартного температурного режиму. За результатами таких випробувань визначено дані щодо необхідної мінімальної товщини вогнезахисних покриттів різних торговельних марок, деякі з яких наведено в [4].

Водночас відповідно до положень Єврокодів № 1 [5] і № 3 [1] для

оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій, крім стандартного температурного режиму, можуть застосовуватись інші номінальні (нормовані) температурні режими, такі як режим вуглеводневої пожежі і режим зовнішньої пожежі. Серед цих номінальних режимів температурний режим вуглеводневої пожежі є найбільш жорстким і стосується пожеж на нафтопереробних підприємствах або у транспортних тунелях, де наявність великої кількості горючих рідин призводить до різкого зростання температури газового середовища вже у перші хвилини пожежі (табл. 1). Температурний режим зовнішньої пожежі, який є менш інтенсивним, ніж стандартний температурний режим (табл. 1), використовують для зовнішніх конструкцій будівель, компонентами яких можуть бути сталеві конструкції. Цей температурний режим моделює вплив на зовнішню конструкцію вогню, що може виходити з вікна будівлі, або від пожежі ззовні, що відбувається в режимі вільного горіння [6].

Таблиця 1 – Температура газового середовища для номінальних температурних режимів залежно від тривалості пожежі

Тривалість номінальної пожежі $t$ , хв	Температура газового середовища $\theta_g$ (°C) для:		
	стандартного температурного режиму	режиму вуглеводневої пожежі	режиму зовнішньої пожежі
0	20	20	20
5	576	948	588
10	678	1034	662
15	739	1071	676
30	842	1098	680
45	902	1100	680
60	945	1100	680
90	1006	1100	680
120	1049	1100	680
150	1082	1100	680
180	1110	1100	680
240	1153	1100	680

Якщо для більшості вогнезахисних покриттів, застосованих для сталевих конструкцій, наявні дані щодо їхньої необхідної мінімальної товщини, визначені

для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму, то таких даних немає для умов вогневого впливу, які відповідають іншим номінальним

температурним режимам. Через брак таких даних обмежується сфера застосування вогнезахисних матеріалів, призначених для вогнезахисту сталевих конструкцій, і немає можливості проводити оптимізацію параметрів систем вогнезахисту для умов вогневого впливу, які відрізняються від стандартного температурного режиму. Зважаючи на необхідність розширення сфери застосування вогнезахисних матеріалів для сталевих конструкцій і проведення оптимізації їх вогнезахисту для подальшого удосконалення й розвитку технології вогнезахисту цих конструкцій, актуальним слід вважати дослідження, спрямоване на виявлення впливу номінальних температурних режимів пожежі на необхідну мінімальну товщину вогнезахисних покриттів для сталевих конструкцій.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій виконують із застосуванням сценаріїв умовної або реальної пожежі. Для сценарію умовної пожежі використовують номінальні температурні режими, серед яких найбільш застосовним є стандартний температурний режим [1]. Для умов вогневого впливу, які відповідають стандартному температурному режиму, здійснюють класифікацію сталевих конструкцій за вогнестійкістю, а також визначають товщину вогнезахисту, яка має бути для забезпечення нормованої вогнестійкості сталевих конструкцій, застосовуваних усередині будівель [6–7].

У роботі [4] наведено експериментальні дані щодо значення цієї товщини для пасивних і реактивних вогнезахисних матеріалів, призначених для вогнезахисту сталевих конструкцій, які отримано для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму та надано у табличній формі відповідно до положень EN 13381-4:2013 [2] і EN 13381-8:2013 [3]. Водночас значення необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття  $d_{p,min}$  наведено для різних величин критичної температури сталі  $\theta_{cr}$ , коефіцієнта поперечного перерізу

$A_m/V$  і проміжку часу збереженості вогнестійкості  $t_f$  сталевій конструкції. З аналізу наведених у роботі [4] даних випливає наявність різниці у значеннях товщини  $d_{p,min}$  для вогнезахисних матеріалів різних торговельних марок, що може бути зумовлено відмінністю в їхніх теплофізичних властивостях.

Розрахункові залежності між необхідною мінімальною товщиною систем вогнезахисту  $d_{p,min}$  для сталевих конструкцій з вогнезахисним екраном і без нього, теплофізичними властивостями вогнезахисних матеріалів, які є компонентами цих систем вогнезахисту, критичною температурою сталі  $\theta_{cr}$ , коефіцієнтом поперечного перерізу  $A_m/V$  і проміжком часу  $t_f$  наведено в роботі [8]. Ці залежності також отримано для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму. В цій роботі показано, що значення товщини вогнезахисту  $d_{p,min}$  для цих систем суттєво залежить від коефіцієнта теплопровідності застосованих вогнезахисних матеріалів  $\lambda_p$ , коефіцієнта поперечного перерізу  $A_m/V$ , критичної температури сталі  $\theta_{cr}$  і проміжку часу  $t_{fr}$  (з підвищенням  $\lambda_p$ ,  $A_m/V$ ,  $t_{fr}$  і зменшенням  $\theta_{cr}$  товщина  $d_{p,min}$  збільшується).

У роботі [9] наведено залежності проміжків часу досягнення різної критичної температури сталі ( $\theta_{cr} = 450$  °C, 500 °C, 550 °C, 600 °C) від коефіцієнта поперечного перерізу  $A_m/V$  для незахищених сталевих конструкцій для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму і за режиму вуглеводневої пожежі. З наведених у цій роботі даних випливає, що для сталевих конструкцій, неоснащених вогнезахистом, ці проміжки часу для температурного режиму вуглеводневої пожежі на (45–60) % менші, ніж для стандартного температурного режиму. Також для цих двох номінальних температурних режимів пожежі наведено залежності проміжку часу  $t_{f,500}$  досягнення критичної температури сталі  $\theta_{cr} = 500$  °C від коефіцієнта поперечного перерізу  $A_m/V$  для сталевих конструкцій, оснащених

вогнезахисними покриттями з піщано-цементної штукатурки та матеріалу «Ньюспрей». З аналізу цих залежностей випливає, що для зазначених захищених сталевих конструкцій проміжок часу  $t_{f,500}$  менший на (17–59) % для температурного режиму вуглеводневої пожежі, ніж для стандартного температурного режиму. Водночас ця різниця менша для вогнезахисного покриття з піщано-цементної штукатурки, ніж для вогнезахисного покриття з матеріалу «Ньюспрей», і підвищується зі збільшенням коефіцієнта поперечного перерізу  $A_m/V$  та товщини вогнезахисного покриття.

Питання щодо співвідношення між значеннями товщини  $d_{p,min}$  для сталевих конструкцій, необхідними для забезпечення вогнестійкості в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму і за режиму вуглеводневої пожежі, розглянуто в [10]. За результатами проведеного в цій роботі дослідження встановлено, що для сталевих конструкцій з вогнезахисним покриттям з матеріалу «Amotherm Steel Wb», що спучується, для критичної температури сталі, яка становить 500 °С, і проміжку часу збереженості вогнестійкості  $t_f = 30$  хв значення необхідної мінімальної товщини цього вогнезахисного покриття для вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі приблизно удвічі більші, ніж для стандартного температурного режиму.

Наведені вище результати досліджень дають змогу обґрунтовано підходити до визначення необхідної мінімальної товщини вогнезахисту сталевих конструкцій для сценарію умовної пожежі у разі вогневого впливу за стандартного температурного режиму. В цих дослідженнях для зазначеного вогневого впливу наведено залежності між необхідною мінімальною товщиною вогнезахисту і параметрами різних систем вогнезахисту, а також дані щодо значення цієї товщини для сталевих конструкцій, оснащених конкретними типами вогнезахисних матеріалів. Однак в їх

результатах бракує залежностей і даних щодо необхідної мінімальної товщини вогнезахисту для сталевих конструкцій, які стосуються вогневого впливу за іншими номінальними температурними режимами, а також даних щодо співвідношення значень цієї товщини, отриманих за різними номінальними режимами. Така невизначеність щодо необхідної мінімальної товщини вогнезахисту для сталевих конструкцій за різними номінальними температурними режимами пожежі зумовила проведення дослідження в цьому напрямі.

**Формулювання цілей дослідження.** За мету дослідження ставилось виявлення впливу номінальних температурних режимів пожежі на необхідну мінімальну товщину вогнезахисного покриття для таких несучих сталевих конструкцій, як колони і балки, для широких діапазонів змінювання теплофізичних властивостей застосовного вогнезахисного матеріалу, критичної температури сталі, коефіцієнта поперечного перерізу і проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевій конструкції.

Для досягнення цієї мети було поставлено такі завдання:

- визначити залежності необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття для сталевих конструкцій від теплофізичних властивостей застосовного вогнезахисного матеріалу, критичної температури сталі, коефіцієнта поперечного перерізу і проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевій конструкції для умов вогневого впливу за температурними режимами вуглеводневої та зовнішньої пожежі;

- визначити різницю між значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття для сталевих конструкцій, отриманими для умов вогневого впливу за температурними режимами вуглеводневої та зовнішньої пожежі, і значеннями такої товщини, встановленими за стандартного температурного режиму;

- визначити залежності цієї різниці

від теплофізичних властивостей застосовного вогнезахисного матеріалу, критичної температури сталі, коефіцієнта поперечного перерізу та проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевій конструкції.

**Методи дослідження.** Застосовано метод дослідження, складовими якого є обчислювальні процедури чисельного моделювання теплового стану сталевих конструкцій, оснащених вогнезахисним матеріалом із заданими теплофізичними властивостями, в умовах вогневого впливу за температурними режимами вуглеводневої та зовнішньої пожеж, операції аналізу, порівняння, узагальнення та систематизації отриманих розрахункових даних. Для розрахунку теплового стану захищених сталевих конструкцій в умовах вогневого впливу використано однімірну двошарову математичну модель теплопровідності, яка складається із системи рівнянь, наведену в [8]. Значення коефіцієнтів тепловіддачі конвекцією і теплового випромінювання на обігрівній поверхні вогнезахисного покриття, теплофізичні властивості сталі та інші параметри цієї моделі обрані такими, як наведено у [5; 11]. Розв'язання математичної моделі виконано методом кінцевих різниць за неявною схемою апроксимації із використанням пакету прикладних програм FRIEND [12].

**Виклад основного матеріалу.** Для визначення залежності необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття від теплофізичних властивостей застосовного вогнезахисного матеріалу, критичної температури сталі, коефіцієнта поперечного перерізу та проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевій конструкції для умов вогневого впливу за температурними режимами вуглеводневої та зовнішньої пожеж використано процедуру, основні положення якої взято з роботи [8].

Відповідно до цієї процедури для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі через багаторазове розв'язування прямої задачі теплопровідності визначали дані щодо необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття  $d_{p,min,HC}$ , за якої для тривалості вогневого впливу, що відповідає проміжку часу збереженості вогнестійкості  $t_{fr}$ , розрахункова температура сталевій конструкції  $\theta_{a,cal}$  із коефіцієнтом поперечного перерізу  $A_m/V$  дорівнює критичній температурі сталі  $\theta_{cr}$ .

Розрахунки товщини  $d_{p,min,HC}$  проводили для всіх комбінацій значень коефіцієнта теплопровідності застосовного вогнезахисного матеріалу ( $\lambda_{p,min} = 0,02$  Вт/(м·°C);  $\lambda_{p,med} = 0,2$  Вт/(м·°C);  $\lambda_{p,max} = 2,0$  Вт/(м·°C)), критичної температури сталі ( $\theta_{cr,min} = 350$  °C;  $\theta_{cr,med} = 500$  °C;  $\theta_{cr,max} = 700$  °C), коефіцієнта поперечного перерізу ( $(A_m/V)_{min} = 40$  м<sup>-1</sup>;  $(A_m/V)_{med} = 150$  м<sup>-1</sup>;  $(A_m/V)_{max} = 300$  м<sup>-1</sup>) і проміжку часу збереженості вогнестійкості ( $t_{fr,min} = 30$  хв;  $t_{fr,med} = 90$  хв;  $t_{fr,max} = 240$  хв) сталевій конструкції. Загальна кількість цих комбінацій становила 81. Питому теплоємність вогнезахисного матеріалу брали сталою і рівною  $c_p \rho_p = 500$  кДж/(м<sup>3</sup>·°C) ( $c_p = 1000$  Дж/(кг·°C),  $\rho_p = 500$  кг/м<sup>3</sup>) [8].

Таким же чином визначали дані щодо необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття  $d_{p,min,ef}$  для умов вогневого впливу за температурного режиму зовнішньої пожежі, за винятком того, що розрахунки не проводили для критичної температури сталі  $\theta_{cr,max} = 700$  °C. Це пов'язано з тим, що для цього режиму сталева конструкція не може досягнути температури 700 °C через те, що вона більша за максимальне значення температури газового середовища  $\theta_g$ , яке складає 680 °C (табл. 1). Результати розрахунків товщини  $d_{p,min,HC}$  і  $d_{p,min,ef}$  наведено в табл. 2, 3.



Таблиця 2 – Результати розрахунків товщини  $d_{p,min,HC}$

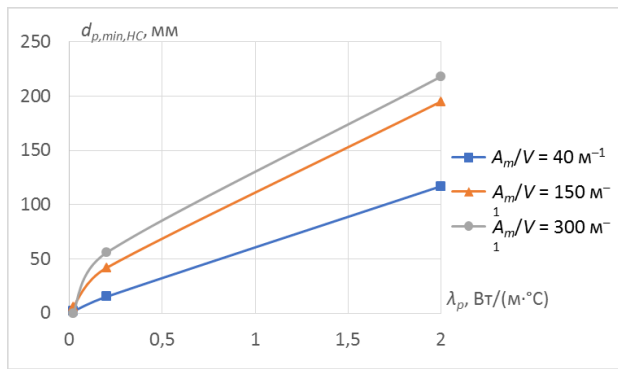
$A_m/V$ , $m^{-1}$	$\lambda_p$ , Вт/(м·°С)	Товщина $d_{p,min,HC}$ (в мм) для:								
		$\theta_{cr,min}$ , $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,med}$ , $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,max}$ , $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,min}$ , $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,med}$ , $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,max}$ , $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,min}$ , $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,med}$ , $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,max}$ , $t_{fr,max}$
40	0,02	0,85	0,47	0,21	2,76	1,58	0,78	7,39	4,32	2,19
150	0,02	3,15	1,84	0,91	9,28	5,71	2,98	21,8	14,3	7,87
300	0,02	5,68	3,52	1,82	14,8	10,0	5,65	30,7	22,4	13,8
40	0,2	8,22	4,61	2,09	25,3	15,2	7,71	61,4	39,3	21,0
150	0,2	24,2	15,9	8,53	57,7	41,8	25,4	112	86,4	57,9
300	0,2	33,6	24,6	15,1	71,2	55,8	38,5	129	105	77,1
40	2,0	65,3	40,6	19,8	167	117	67,9	335	253	164
150	2,0	118	90,5	59,6	242	195	142	429	354	270
300	2,0	136	109	79,4	263	218	168	452	379	299

Таблиця 3 – Результати розрахунків товщини  $d_{p,min,ef}$

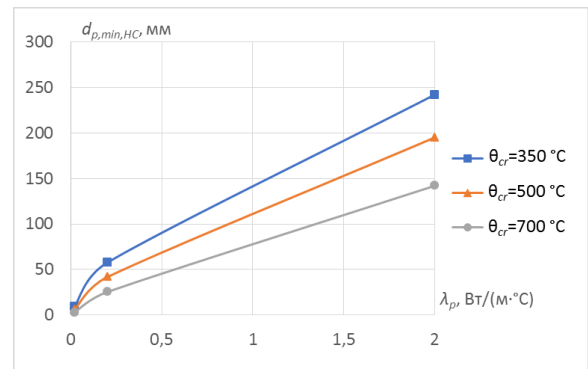
$A_m/V$ , $m^{-1}$	$\lambda_p$ , Вт/(м·°С)	Товщина $d_{p,min,ef}$ (в мм) для:								
		$\theta_{cr,min}$ , $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,med}$ , $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,max}$ , $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,min}$ , $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,med}$ , $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,max}$ , $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,min}$ , $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,med}$ , $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,max}$ , $t_{fr,max}$
40	0,02	0,32	0,06	–	1,35	0,60	–	3,83	1,83	–
150	0,02	1,58	0,71	–	5,11	2,52	–	13,0	6,83	–
300	0,02	3,12	1,52	–	9,13	4,88	–	20,7	12,2	–
40	0,2	3,14	0,60	–	12,9	5,84	–	35,1	17,6	–
150	0,2	13,6	6,59	–	37,9	21,6	–	79,9	50,8	–
300	0,2	21,9	12,5	–	51,4	33,6	–	97,6	68,4	–
40	2,0	26,9	5,30	–	99,3	50,8	–	227	137	–
150	2,0	75,4	43,9	–	175	119	–	325	235	–
300	2,0	93,4	62,2	–	197	142	–	349	261	–

Із аналізу цих даних випливає, що як для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі, так і для умов вогневого впливу за температурного режиму зовнішньої пожежі необхідна мінімальна товщина вогнезахисного покриття збільшується із підвищенням коефіцієнта теплопровідності застосовного вогнезахисного матеріалу  $\lambda_p$ , коефіцієнта поперечного перерізу  $A_m/V$ , проміжку часу збереженості вогнестійкості  $t_{fr}$  і зі зменшенням критичної температури сталі  $\theta_{cr}$ . Зокрема, для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі за  $\theta_{cr,med} = 500$  °С,  $t_{fr,med} = 90$  хв і підвищення  $\lambda_p$  від 0,02 Вт/(м·°С) до 2,0 Вт/(м·°С) товщина  $d_{p,min,HC}$  збільшується: від 1,58 мм до 117 мм – для  $(A_m/V)_{min} = 40$  м<sup>-1</sup>; від 5,71 мм до 195 мм – для  $(A_m/V)_{med} = 150$  м<sup>-1</sup>; від 10,0 мм до 218 мм – для  $(A_m/V)_{max} = 300$  м<sup>-1</sup> (рис. 1а).

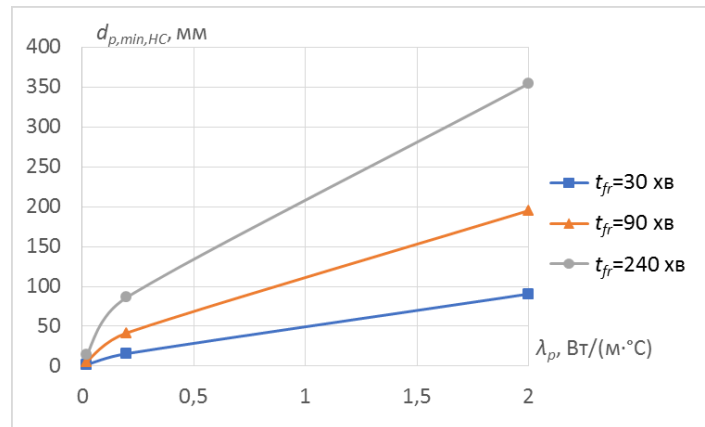
У разі  $(A_m/V)_{med} = 150$  м<sup>-1</sup>,  $t_{fr,med} = 90$  хв і підвищення  $\lambda_p$  від 0,02 Вт/(м·°С) до 2,0 Вт/(м·°С) товщина  $d_{p,min,HC}$  збільшується: від 9,28 мм до 242 мм – для  $\theta_{cr,min} = 350$  °С; від 5,71 мм до 195 мм – для  $\theta_{cr,med} = 500$  °С; від 2,98 мм до 142 мм – для  $\theta_{cr,max} = 700$  °С (рис. 1б). За  $(A_m/V)_{med} = 150$  м<sup>-1</sup>,  $\theta_{cr,med} = 500$  °С і підвищення  $\lambda_p$  від 0,02 Вт/(м·°С) до 2,0 Вт/(м·°С) товщина  $d_{p,min,HC}$  збільшується: від 1,84 мм до 90,5 мм – для  $t_{fr,min} = 30$  хв; від 5,71 мм до 195 мм – для  $t_{fr,med} = 90$  хв; від 14,3 мм до 354 мм – для  $t_{fr,max} = 240$  хв (рис. 1в). Діапазон значень необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі складає від 0,21 мм до 452 мм, і він є ширшим, ніж для режиму зовнішньої пожежі, для якого цей діапазон складає від 0,06 мм до 349 мм.



а



б



в

Рисунок 1 – Залежності товщини  $d_{p,min,HC}$  від коефіцієнта теплопровідності  $\lambda_p$  і коефіцієнта поперечного перерізу (а), критичної температури сталі (б), проміжку часу збереженості вогнестійкості (в) для  $\theta_{cr,med} = 500^\circ\text{C}$ ,  $(A_m/V)_{med} = 150 \text{ м}^{-1}$ ,  $t_{fr,med} = 90 \text{ хв}$

Дані щодо різниці між наведеними в табл. 2, 3 значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття для сталевих конструкцій, отриманими для умов вогневого впливу за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожежі, та значеннями цієї товщини, визначеними за стандартного температурного режиму (див. табл. 4 [8]), вказано в табл. 5, 6. Цю різницю розраховували за такими формулами:

$$\delta_{d,HC} = 100(d_{p,min,HC} - d_{p,min})/d_{p,min}; \quad (1)$$

$$\delta_{d,ef} = 100(d_{p,min,ef} - d_{p,min})/d_{p,min}, \quad (2)$$

де  $\delta_{d,HC}$  – різниця між значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття, отриманими для умов вогневого впливу за температурного

режиму вуглеводневої пожежі та за стандартного температурного режиму, %;

$\delta_{d,ef}$  – різниця між значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття, отриманими для умов вогневого впливу за температурного режиму зовнішньої пожежі та за стандартного температурного режиму, %;

$d_{p,min,HC}$  і  $d_{p,min,ef}$  – значення необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття, що отримані для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі та за температурного режиму зовнішньої пожежі й наведені в табл. 1, 2, мм;

$d_{p,min}$  – значення необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття, що отримані для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму та наведені в табл. 4 [8], мм.

Таблиця 4 – Дані щодо товщини  $d_{p,min}$ , що отримані для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму [8]

$A_m/V$ , $M^{-1}$	$\lambda_p$ , Вт/(м·°С)	Товщина $d_{p,min}$ (у мм) для:								
		$\theta_{cr,min}$ , $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,med}$ , $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,max}$ , $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,min}$ , $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,med}$ , $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,max}$ , $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,min}$ , $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,med}$ , $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,max}$ , $t_{fr,max}$
40	0,02	0,44	0,17	–	2,07	1,13	0,49	6,75	3,94	1,98
150	0,02	1,89	0,96	0,29	7,28	4,26	1,99	20,2	13,2	7,15
300	0,02	3,64	1,97	0,68	12,1	7,74	3,90	28,7	20,8	12,7
40	0,2	4,25	1,64	–	19,4	11,1	4,83	56,5	35,9	19,1
150	0,2	15,8	8,78	2,80	48,1	33,0	17,8	105	80,4	53,2
300	0,2	24,3	15,4	6,20	61,3	46,1	28,8	122	98,1	71,5
40	2,0	35,4	14,8	–	135	88,0	43,8	311	233	149
150	2,0	83,6	55,3	22,3	208	161	108	404	331	251
300	2,0	101	73,3	38,5	229	184	132	427	356	279

Таблиця 5 – Дані щодо різниці  $\delta_{d,HC}$

$A_m/V$ , $M^{-1}$	$\lambda_p$ , Вт/(м·°С)	Значення $\delta_{d,HC}$ (у %) для:								
		$\theta_{cr,min}$ , $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,med}$ , $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,max}$ , $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,min}$ , $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,med}$ , $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,max}$ , $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,min}$ , $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,med}$ , $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,max}$ , $t_{fr,max}$
40	0,02	93,2	176	–	33,3	39,8	59,2	9,48	9,64	10,6
150	0,02	66,7	91,7	214	27,5	34,0	49,8	7,92	8,33	10,1
300	0,02	56,0	78,7	168	22,3	29,2	44,9	6,97	7,69	8,66
40	0,2	93,4	181	–	30,4	36,9	59,6	8,67	9,47	9,95
150	0,2	53,2	81,1	204	20,0	26,7	42,7	6,67	7,46	8,83
300	0,2	38,3	59,7	144	16,2	21,0	33,7	5,74	7,03	7,83
40	2,0	84,5	174	–	23,7	33,0	55,0	7,72	8,58	10,1
150	2,0	41,2	63,7	167	16,4	21,1	31,5	6,19	6,95	7,57
300	2,0	34,7	48,7	106	14,9	18,5	27,3	5,85	6,46	7,17

Таблиця 6 – Дані щодо різниці  $\delta_{d,ef}$

$A_m/V$ , $M^{-1}$	$\lambda_p$ , Вт/(м·°С)	Значення $\delta_{d,ef}$ (у %) для:								
		$\theta_{cr,min}$ , $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,med}$ , $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,max}$ , $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,min}$ , $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,med}$ , $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,max}$ , $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,min}$ , $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,med}$ , $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,max}$ , $t_{fr,max}$
40	0,02	-27,3	-64,7	–	-34,8	-46,9	–	-43,3	-53,6	–
150	0,02	-16,4	-26,0	–	-29,8	-40,9	–	-35,6	-48,3	–
300	0,02	-14,3	-22,8	–	-24,6	-37,0	–	-27,9	-41,4	–
40	0,2	-26,1	-63,4	–	-33,5	-47,4	–	-37,9	-51,0	–
150	0,2	-13,9	-24,9	–	-21,2	-34,6	–	-23,9	-36,8	–
300	0,2	-9,88	-18,8	–	-16,2	-27,1	–	-20,0	-30,3	–
40	2,0	-24,0	-64,2	–	-26,4	-42,3	–	-27,0	-41,2	–
150	2,0	-9,81	-20,6	–	-15,9	-26,1	–	-19,6	-29,0	–
300	2,0	-7,52	-15,1	–	-14,0	-22,8	–	-18,3	-26,7	–

Із аналізу даних, наведених у табл. 5, випливає, що різниця  $\delta_{d,HC}$  між значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття для сталевих конструкцій, отриманими для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі і за стандартного температурного режиму, залежить від коефіцієнта теплопровідності застосовного вогнезахисного матеріалу  $\lambda_p$ , коефіцієнта поперечного перерізу  $A_m/V$ , критичної температури сталі  $\theta_{cr}$  і проміжку

часу збереженості вогнестійкості  $t_{fr}$  та змінюється в діапазоні від 5,74 % до 214 %. З підвищенням  $\lambda_p$ ,  $A_m/V$ ,  $t_{fr}$  і зі зменшенням  $\theta_{cr}$  різниця  $\delta_{d,HC}$  зменшується. Найбільший вплив на її величину має значення проміжку часу  $t_{fr}$ . Найбільші значення (від 34,7 % до 214 %) різниця  $\delta_{d,HC}$  має для проміжку часу  $t_{fr}$ , який складає 30 хв, найменші (від 5,74 % до 10,6 %) – для 240 хв. Вплив коефіцієнта теплопровідності застосовного вогнезахисного матеріалу  $\lambda_p$ , коефіцієнта

поперечного перерізу  $A_m/V$  і критичної температури  $\theta_{cr}$  на різницю  $\delta_{d,HC}$  є значним для проміжку часу  $t_{fr,min} = 30$  хв, а з підвищенням цього проміжку часу він слабкішає. Зокрема, за  $(A_m/V)_{med} = 150 \text{ м}^{-1}$ ,  $\theta_{cr,med} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$  і підвищення проміжку часу  $t_{fr}$  від 30 хв до 240 хв різниця  $\delta_{d,HC}$  зменшується: від 91,7 % до 8,33 % – для  $\lambda_p = 0,02 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ ; від 81,1 % до 7,46 % – для  $\lambda_p = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ ; від 63,7 % до 6,95 % – для  $\lambda_p = 2,0 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$  (рис. 2а). За  $t_{fr,min} = 30$  хв,  $\theta_{cr,med} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$  і підвищення коефіцієнта поперечного

перерізу  $A_m/V$  від  $40 \text{ м}^{-1}$  до  $300 \text{ м}^{-1}$  різниця  $\delta_{d,HC}$  зменшується: від 176 % до 78,7 % – для  $\lambda_p = 0,02 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ ; від 181 % до 59,7 % – для  $\lambda_p = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ ; від 174 % до 48,7 % – для  $\lambda_p = 2,0 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$  (рис. 2б). За  $t_{fr,min} = 30$  хв,  $(A_m/V)_{med} = 150 \text{ м}^{-1}$  і підвищення критичної температури сталі  $\theta_{cr}$  від  $350 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  різниця  $\delta_{d,HC}$  збільшується: від 66,7 % до 214 % – для  $\lambda_p = 0,02 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ ; від 53,2 % до 205 % – для  $\lambda_p = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ ; від 41,2 % до 167 % – для  $\lambda_p = 2,0 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$  (рис. 2в).

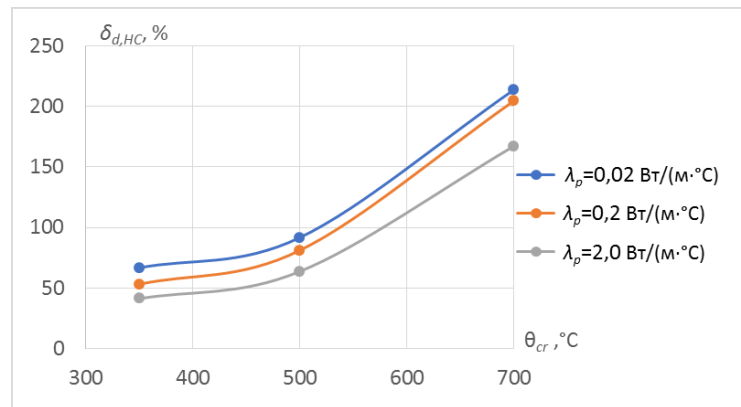
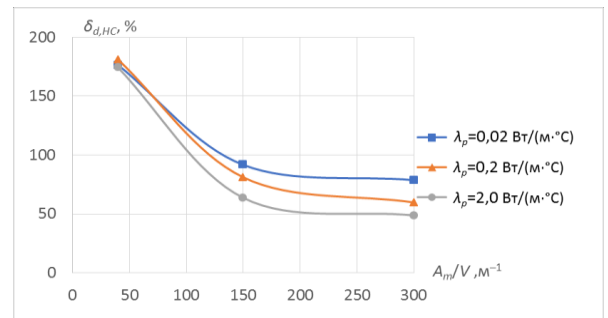
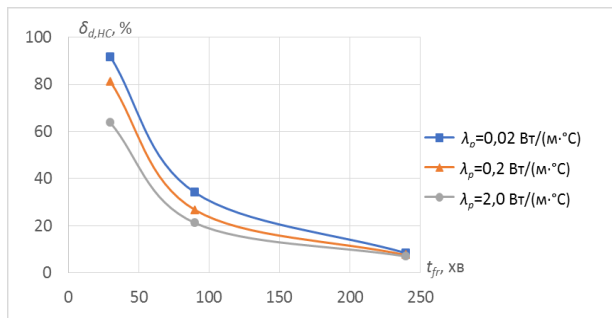


Рисунок 2 – Залежності різниці  $\delta_{d,HC}$  від проміжку часу  $t_{fr}$  (а), коефіцієнта поперечного перерізу  $A_m/V$  (б), критичної температури сталі  $\theta_{cr}$  (в) для різних значень коефіцієнта теплопровідності  $\lambda_p$

Із аналізу даних, наведених у табл. 6, випливає, що різниця  $\delta_{d,ef}$  між значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття для сталевих конструкцій, отриманими для умов вогневого впливу за температурного режиму зовнішньої пожежі і за стандартного температурного режиму, також як і різниця  $\delta_{d,HC}$  залежить від коефіцієнта теплопровідності застосовного вогнезахисного матеріалу  $\lambda_p$ , коефіцієнта поперечного перерізу  $A_m/V$ , критичної температури сталі  $\theta_{cr}$  та проміжку часу

збереженості вогнестійкості  $t_{fr}$  і змінюється в діапазоні від  $-7,52 \%$  до  $-64,7 \%$ . З підвищенням  $\lambda_p$ ,  $A_m/V$  і зі зменшенням  $\theta_{cr}$  різниця  $\delta_{d,ef}$  (за модулем) зменшується. Зокрема, за  $t_{fr,med} = 90$  хв,  $\theta_{cr,med} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$  і підвищення коефіцієнта поперечного перерізу  $A_m/V$  від  $40 \text{ м}^{-1}$  до  $300 \text{ м}^{-1}$  різниця  $\delta_{d,ef}$  зменшується: від  $-46,9 \%$  до  $-37,0 \%$  – для  $\lambda_p = 0,02 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ ; від  $-47,4 \%$  до  $-27,1 \%$  – для  $\lambda_p = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ ; від  $-42,3 \%$  до  $-22,8 \%$  – для  $\lambda_p = 2,0 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$  (рис. 3а). За  $t_{fr,med} = 90$  хв,  $(A_m/V)_{med} = 150 \text{ м}^{-1}$  і

підвищення критичної температури сталі  $\theta_{cr}$  від 350 °C до 500 °C різниця  $\delta_{d,ef}$  збільшується: від -29,8 % до -40,9, % – для  $\lambda_p = 0,02$  Вт/(м·°C); від -21,2 % до -34,6 % – для  $\lambda_p = 0,2$  Вт/(м·°C); від -15,9 % до -26,1, % – для  $\lambda_p = 2,0$  Вт/(м·°C) (рис. 3б). Водночас залежність різниці  $\delta_{d,ef}$  від проміжку часу  $t_{fr}$  є неоднозначною. За  $(A_m/V)_{min} = 40$  м<sup>-1</sup> і  $\theta_{cr,med} = 500$  °C з підвищенням  $t_{fr}$  від 30 хв до 90 хв різниця зменшується, а потім збільшується

(крім варіанту з  $\lambda_p = 2,0$  Вт/(м·°C)). Для інших комбінацій  $A_m/V$  і  $\theta_{cr}$  різниця  $\delta_{d,ef}$  збільшується з підвищенням  $t_{fr}$ . Зокрема, за  $(A_m/V)_{med} = 150$  м<sup>-1</sup>,  $\theta_{cr,med} = 500$  °C і підвищення проміжку часу  $t_{fr}$  від 30 хв до 240 хв різниця  $\delta_{d,ef}$  збільшується: від -26,0 % до -48,3 % – для  $\lambda_p = 0,02$  Вт/(м·°C); від -24,9 % до -36,8 % – для  $\lambda_p = 0,2$  Вт/(м·°C); від -20,6 % до -29,0 % – для  $\lambda_p = 2,0$  Вт/(м·°C) (рис. 3в).

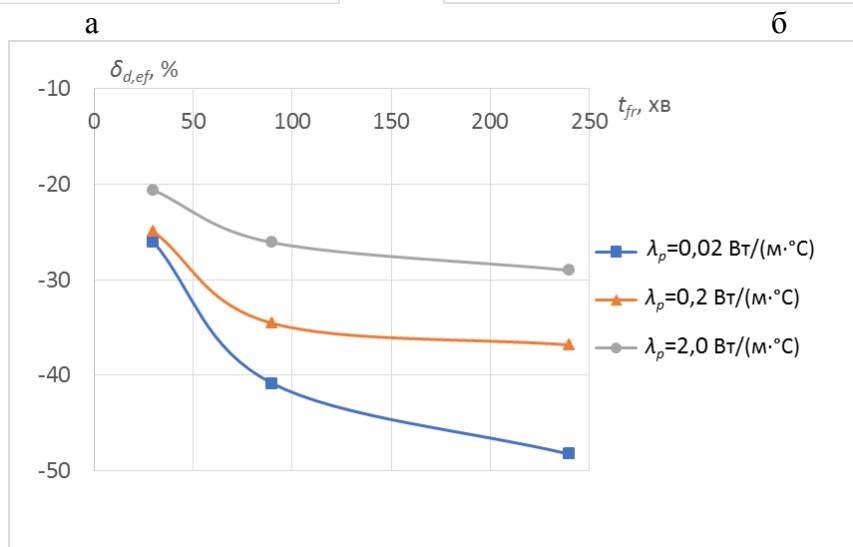
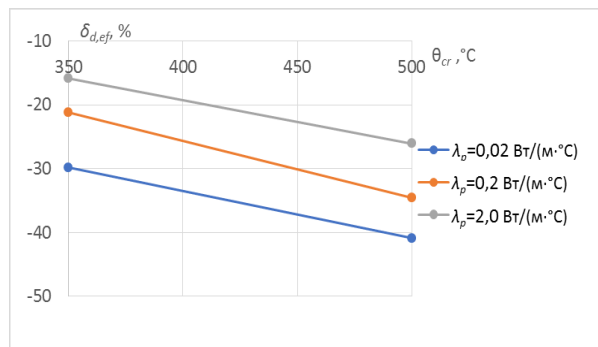
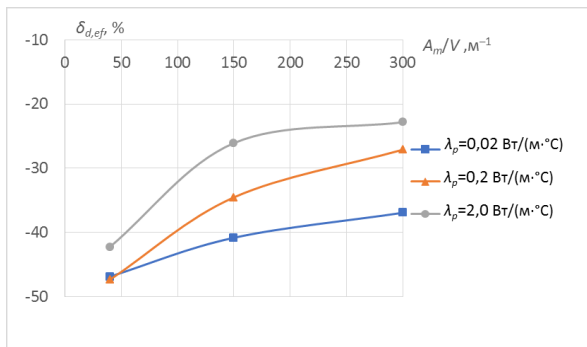


Рисунок 3 – Залежності різниці  $\delta_{d,ef}$  від коефіцієнта поперечного перерізу  $A_m/V$  (а), критичної температури сталі  $\theta_{cr}$  (б), проміжку часу  $t_{fr}$  (в) для різних значень коефіцієнта теплопровідності  $\lambda_p$

Отримані дані щодо різниці між значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття для сталевих конструкцій, встановленими для умов вогневого впливу за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожежі, та значеннями такої товщини, визначеними за стандартного температурного режиму, які наведено в табл. 5, 6, дають змогу стверджувати таке:

– ця різниця для умов вогневого

впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі має позитивні значення, а для умов вогневого впливу за температурного режиму зовнішньої пожежі – від’ємні (необхідна мінімальна товщина вогнезахисного покриття для температурного режиму вуглеводневої пожежі більша, ніж для стандартного температурного режиму, а для температурного режиму зовнішньої пожежі – менша);

– ця різниця як для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі, так і для умов вогневого впливу за температурного режиму зовнішньої пожежі з підвищенням коефіцієнта теплопровідності застосовного вогнезахисного матеріалу  $\lambda_p$ , коефіцієнта поперечного перерізу  $A_m/V$  та зі зменшенням критичної температури сталі  $\theta_{cr}$  зменшується. Для температурного режиму вуглеводневої пожежі вплив  $\lambda_p$ ,  $A_m/V$  і  $\theta_{cr}$  на різницю  $\delta_{d,HC}$  є значним для проміжку часу  $t_{fr,min} = 30$  хв, а з підвищенням цього проміжку він слабкішає. Для температурного режиму зовнішньої пожежі залежності інтенсивності впливу  $\lambda_p$ ,  $A_m/V$  і  $\theta_{cr}$  на різницю  $\delta_{d,ef}$  від проміжку часу  $t_{fr}$  не спостерігається;

– ця різниця як для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі, так і для умов вогневого впливу за температурного режиму зовнішньої пожежі значно залежить від проміжку часу збереженості вогнестійкості  $t_{fr}$ . Закономірним є те, що з підвищенням цього проміжку часу для температурного режиму вуглеводневої пожежі вона зменшується, а для температурного режиму зовнішньої пожежі – збільшується. Це зумовлено відмінністю у рівнях теплового впливу на захищену сталеву конструкцію, які мають місце в умовах різних номінальних температурних режимів. Цей рівень визначається тепловим потоком на обігрівній поверхні конструкції (на зовнішній поверхні вогнезахисного покриття), величина якого залежить від температури газового середовища  $\theta_g$  (°C), і тривалістю вогневого впливу. Кількість теплоти, яка надходить до конструкції протягом певного проміжку часу вогневого впливу, прямо пропорційна площі під залежністю температури

газового середовища  $\theta_g$  від тривалості номінальної пожежі  $t$ . У табл. 7 наведено дані щодо площі під залежністю температури газового середовища  $\theta_g$  від тривалості номінальної пожежі  $t$  (табл. 1), отримані за формулою (Г. 2) ДСТУ [13] для стандартного температурного режиму ( $A_S$ ), температурного режиму вуглеводневої пожежі ( $A_{HC}$ ) і температурного режиму зовнішньої пожежі ( $A_{ef}$ ), а також дані щодо співвідношення цих площ, які визначено за такими формулами:

$$\delta_{A,HC} = 100(A_{HC} - A_S)/A_S; \quad (3)$$

$$\delta_{A,ef} = 100(A_{ef} - A_S)/A_S, \quad (4)$$

де  $\delta_{A,HC}$  – різниця між площами під залежностями температури газового середовища  $\theta_g$  від тривалості номінальної пожежі, отриманими для температурного режиму вуглеводневої пожежі та для стандартного температурного режиму, %;

$\delta_{A,ef}$  – різниця між площами під залежностями температури газового середовища  $\theta_g$  від тривалості номінальної пожежі, отриманими для температурного режиму зовнішньої пожежі та для стандартного температурного режиму, %;

$A_{HC}$  – площа під залежністю температури газового середовища  $\theta_g$  від тривалості номінальної пожежі для температурного режиму вуглеводневої пожежі, °C·хв;

$A_{ef}$  – площа під залежністю температури газового середовища  $\theta_g$  від тривалості номінальної пожежі для температурного режиму зовнішньої пожежі, °C·хв;

$A_S$  – площа під залежністю температури газового середовища  $\theta_g$  від тривалості номінальної пожежі для стандартного температурного режиму, °C·хв.

Таблиця 7 – Площі під залежністю  $\theta_g(t)$  для номінальних температурних режимів пожежі, а також їхнє співвідношення

Тривалість номінальної пожежі $t$ , хв	Площа ( $у \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{хв}$ ) для:			Різниця між площами ( $у \%$ ):	
	стандартного температурного режиму, $A_S$	температурного режиму вуглеводневої пожежі, $A_{HC}$	температурного режиму зовнішньої пожежі, $A_{ef}$	$\delta_{A,HC}$	$\delta_{A,ef}$
5	1490	2420	1520	62,4	2,0
10	4625	7375	4645	59,5	0,4
15	8168	12638	7990	54,7	-2,2
30	20025	28905	18160	44,3	-9,3
45	33105	45390	28360	37,1	-14,3
60	46958	61890	38560	31,8	-17,9
90	76223	94890	58960	24,5	-22,7
120	107048	127890	79360	19,5	-25,9
150	139013	160890	99760	15,7	-28,2
180	171893	193890	120160	12,8	-30,1
240	239783	259890	160960	8,4	-32,9

З аналізу даних, наведених у табл. 7, і рис. 4 випливає, що площа  $A_{HC}$  під залежністю  $\theta_g(t)$  для температурного режиму вуглеводневої пожежі більша за площу  $A_S$  для стандартного температурного режиму, і з підвищенням тривалості пожежі від 5 хв до 240 хв різниця  $\delta_{A,HC}$  монотонно зменшується від 62,4 % до 8,4 %. Значення  $\delta_{A,HC}$  для проміжку часу  $t_{fr,min} = 30$  хв у 1,8 раза більше, ніж для  $t_{fr,med} = 90$  хв і у 5,3 раза більше ніж для  $t_{fr,max} = 240$  хв. Через наявність такої значної різниці у величині  $\delta_{A,HC}$  для  $t_{fr,min}$ ,  $t_{fr,med}$ ,  $t_{fr,max}$  рівень теплового впливу на захищену сталеву конструкцію під час вогневодневої пожежі порівняно з пожежею за стандартного температурного режиму значно більший для її тривалості 30 хв, ніж для тривалостей 90 хв і 240 хв. З огляду на вказане різниця  $\delta_{d,HC}$  між значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття для сталевих конструкцій, встановленими для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі, і значеннями такої товщини, визначеними за стандартного температурного режиму, має найбільші величини для проміжку часу  $t_{fr,min} = 30$  хв, а найменші – для  $t_{fr,max} = 240$  хв. Для температурного режиму

зовнішньої пожежі площа  $A_{ef}$  під залежністю  $\theta_g(t)$  для тривалості пожежі до 11 хв більша, ніж площа  $A_S$  для стандартного температурного режиму, а для іншої тривалості – менша. З підвищенням тривалості пожежі від 5 хв до 240 хв різниця  $\delta_{A,ef}$  монотонно змінюється від 2,0% до -32,9 %. Значення  $\delta_{A,ef}$  (за модулем) для проміжку часу  $t_{fr,max} = 240$  хв у 1,4 раза більше, ніж для  $t_{fr,med} = 90$  хв і у 3,5 раза більше, ніж для  $t_{fr,min} = 30$  хв. Через наявність такої значної різниці у величині  $\delta_{A,ef}$  для  $t_{fr,min}$ ,  $t_{fr,med}$ ,  $t_{fr,max}$  рівень теплового впливу на захищену сталеву конструкцію під час зовнішньої пожежі порівняно з пожежею за стандартного температурного режиму значно менший для її тривалості 240 хв, ніж для тривалостей 90 хв і 30 хв. Тому різниця  $\delta_{d,ef}$  між значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття для сталевих конструкцій, встановленими для умов вогневого впливу за температурним режимом зовнішньої пожежі, і значеннями такої товщини, визначеними за стандартного температурного режиму, має найбільші величини (за модулем) для проміжку часу  $t_{fr,max} = 240$  хв, а найменші – для  $t_{fr,min} = 30$  хв.

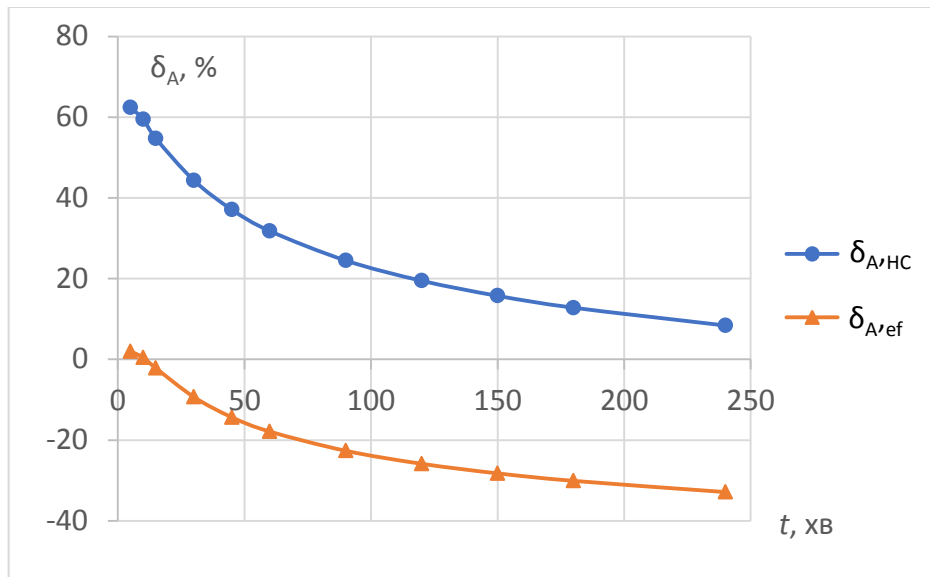


Рисунок 4 – Залежності різниць між площами  $\delta_{A,HC}$ ,  $\delta_{A,ref}$  від тривалості номінальної пожежі

Такі висновки можуть вважатися за доцільні з погляду практики, тому що дають змогу обґрунтовано підходити до оцінювання товщини вогнезахисту сталевих конструкцій для умов вогневого впливу у разі інших номінальних температурних режимів, які відрізнятимуться від стандартного. З погляду теорії вони надають можливість стверджувати про визначеність впливу номінальних температурних режимів пожежі на необхідну мінімальну товщину вогнезахисного покриття для таких несучих сталевих конструкцій, як колони і балки, що є певними перевагами проведеного дослідження. Однак варто відзначити, що результати дослідження отримано для вогнезахисного матеріалу, що має сталі, незалежні від температури значення коефіцієнта теплопровідності, а також певну величину питомої теплоємності  $c_p = 1000 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$  і густини  $\rho_p = 500 \text{ кг}/\text{м}^3$ . Насправді значення коефіцієнта теплопровідності пасивних і реактивних вогнезахисних матеріалів залежать від низки параметрів, зокрема від температури, а їх густина змінюється в широкому діапазоні [7; 14]. Крім того, результати дослідження отримано тільки для системи вогнезахисту без вогнезахисного екрана. Зазначене може призвести до наявності відмінностей в

отриманих результатах стосовно товщини вогнезахисту сталевих конструкцій для умов вогневого впливу у разі інших номінальних температурних режимів, які відрізнятимуться від стандартного.

Така невизначеність накладає певні обмеження на використання отриманих результатів, що може трактуватися, як недоліки цього дослідження. Неможливість зняття цих умов у межах зазначеного дослідження породжує потенційно цікавий напрям подальших розвідок. Вони, зокрема, можуть бути орієнтовані на виявлення впливу номінальних температурних режимів пожежі на необхідну мінімальну товщину різних систем вогнезахисту для сталевих конструкцій, в яких застосовуються вогнезахисні матеріали зі змінним коефіцієнтом теплопровідності та різною густиною, а також вогнезахисні екрани. Таке виявлення дасть змогу оцінити оптимальні параметри різних систем вогнезахисту для сталевих конструкцій, що прийнятні для забезпечення їхньої вогнестійкості в широкому діапазоні тривалості вогневого впливу за різними номінальними температурними режимами.

**Висновки та напрями подальших досліджень.** Під час проведення дослідження визначено залежності необхідної мінімальної



товщини вогнезахисного покриття для таких несучих сталевих конструкцій, як колони і балки, від теплофізичних властивостей застосовного вогнезахисного матеріалу, критичної температури сталі, коефіцієнта поперечного перерізу і проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевій конструкції для умов вогневого впливу за температурними режимами вуглеводневої та зовнішньої пожежі і дані щодо різниці у значеннях такої товщини, отриманих для різних номінальних температурних режимів.

Встановлено, що як для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі, так і для умов вогневого впливу за температурного режиму зовнішньої пожежі необхідна мінімальна товщина вогнезахисного покриття збільшується із підвищенням коефіцієнта теплопровідності застосовного вогнезахисного матеріалу, коефіцієнта поперечного перерізу, проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевій конструкції і зі зменшенням критичної температури сталі. Діапазон значень необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі, отриманих для застосовних під час проведених розрахунків параметрів системи вогнезахисту, складає від 0,21 мм до 452 мм, і він є ширшим, ніж для температурного режиму зовнішньої пожежі, для якого ці значення змінюються в діапазоні від 0,06 мм до 349 мм.

Встановлено, що різниця між

значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття для сталевих конструкцій, отриманими для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі, і значеннями такої товщини, визначеними за стандартного температурного режиму, має позитивні значення (від 5,74 % до 214 %), а для умов вогневого впливу за температурним режимом зовнішньої пожежі – від’ємні (від -7,52 % до -64,7 %). Ця різниця як для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі, так і для умов вогневого впливу за температурного режиму зовнішньої пожежі з підвищенням коефіцієнта теплопровідності застосовного вогнезахисного матеріалу, коефіцієнта поперечного перерізу та зі зменшенням критичної температури сталі зменшується. Закономірним є те, що з підвищенням проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевій конструкції для температурного режиму вуглеводневої пожежі різниця між товщинами зменшується, а для температурного режиму зовнішньої пожежі – збільшується (за модулем).

Визначено напрями подальших досліджень, які орієнтовані на виявлення впливу номінальних температурних режимів пожежі на необхідну мінімальну товщину різних систем вогнезахисту для сталевих конструкцій, в яких застосовуються вогнезахисні матеріали зі змінним коефіцієнтом теплопровідності та різною густиною, а також вогнезахисні екрани.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. EN 1993-1-2:2005. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1–2 : General rules. Structural fire design. European Committee For Standardization. Central Secretariat : rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2005 CEN. 78 p.
2. EN 13381-4:2013. Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Part 4 : Applied passive protection to steel members. European Committee For Standardization. Management Centre : Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2013 CEN. 83 p.
3. EN 13381-8:2013. Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members . Part 8 : Applied reactive protection to steel members. European Committee For Standardization. Management Centre : Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2013 CEN. 80 p.
4. Калафат К., Вахитова Л. Аналитический обзор средств огнезащиты стальных конструкций 2021–2022. Украинский центр стального производства, 2022. 200 с.
5. EN 1991-1-2:2002/AC:2013. Eurocode 1 : Actions on structures. Part 1–2 : General actions – Actions on structures exposed to fire. European Committee For Standardization. Central secretariat : rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2004 CEN. 61 p.
6. EN 13501-2:2016. Fire classification of construction products and building elements – Part 2: Classification using data from fire resistance tests, excluding ventilation services. Cen-Cenelec Management Centre : Rue de la Science 23, B-1040 Brussels. 2016 CEN. 79 p.

7. Круковский П. Г., Новак С. В., Поклонский В. Г., Еременко С. А., Фролов Г. А. Оценка огнестойкости металлических строительных конструкций и огнезащитной способности покрытий (расчетно-экспериментальный подход) : коллективная монография. Киев : Франко Пак, 2021. 148 с.
8. Новак С., Дридз В., Добростан О., Новак М. Вплив теплофізичних властивостей вогнезахисних матеріалів на тепловий стан сталевих колон за стандартного температурного режиму. *Науковий вісник : Цивільний захист та пожежна безпека*. 2022. № 1(13). С. 88–110.
9. Голованов В. И., Крючков Г. И. Оценка огнестойкости стальных конструкций при нормируемых температурных режимах пожара. *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение и ликвидация*. 2021. № 3. С. 52–60.
10. Ковальов А. І., Зобенко Н. В. Методика попередньої оцінки вогнезахисної здатності покриттів для сталевих конструкцій в умовах температурного режиму вуглеводневої пожежі. *Науковий вісник : Цивільний захист та пожежна безпека*. 2016. № 1(1). С. 59–65.
11. ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016 Проектування сталевих конструкцій. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість. Київ : Мінрегіон України, 2016. 111 с.
12. Круковский П. Г. Обратные задачи тепломассопереноса (общий инженерный подход) : монография. Київ : Інститут технічної теплофізики НАН України, 1996. 218 с.
13. ДСТУ Б В.1.1-4-98\* Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги. Київ : Держбуд України, 2005. 19 с.
14. Chao Zhang, Adam Pintar, Jonathan M. Weigand, Joseph A. Main, Fahim Sadek. Impact of variability in thermal properties of SFRM on steel temperatures in fire. *Fire Safety Journal*. 2021. Vol. 123. P. 103361. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103361>.

## REFERENCES

1. EN 1993-1-2:2005. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-2 : General rules – Structural fire design. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Central Secretariat: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2005 CEN. 78 p. [in English].
2. EN 13381-4:2013. Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members – Part 4: Applied passive protection to steel members. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Management Centre: Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2013 CEN. 83 p. [in English].
3. EN 13381-8:2013. Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members – Part 8: Applied reactive protection to steel members. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Management Centre : Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2013 CEN. 80 p. [in English].
4. Kalafat, K., Vakhitova, L. (2022). Analitichnyi ohliad zasobiv vohnezakhystu stalevykh konstrukttsii 2021-2022. Ukrainskiyi tsentr stalevoho vyrobnytstva. Retrieved from [https://rautagroup.com/wp-content/uploads/2018/02/fireproofing-materials\\_catalog\\_2021-22.pdf](https://rautagroup.com/wp-content/uploads/2018/02/fireproofing-materials_catalog_2021-22.pdf) [in Ukrainian].
5. EN 1991-1-2:2002/AC:2013. Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Central ecretariat: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2004 CEN. 61 p. [in English].
6. EN 13501-2:2016. Fire classification of construction products and building elements – Part 2: Classification using data from fire resistance tests, excluding ventilation services. CEN-CENELEC Management Centre: Rue de la Science 23, B-1040 Brussels. 2016 CEN. 79 p. [in English].
7. Krukovskiy, P. H., Novak, S. V., Poklonskiy, V. H., Yeromenko, S. A., Frolov, H. A. (2021). Otsinka vohnestiikosti metalevykh budivelnnykh konstrukttsii ta vohnezakhysnoi zdatnosti pokryttiv (rozrakhunkovo-eksperymentalnyi pidkhid) [Оцінка вогнестійкості металевих будівельних конструкцій та вогнезахисної здатності покриттів (розрахунково-експериментальний підхід)]. Kyiv: TOV «Franko Pak» [in Ukrainian].
8. Novak, S., Dridzh, V., Dobrostan, O., Novak, M. (2022). Vplyv teplofizychnykh vlastyvostei vohnezakhysnykh materialiv na teplovyi stan stalevykh kolon za standartnoho temperaturnoho rezhymu [The influence of thermophysical properties of flame retardant materials on the thermal state of steel columns under a standard temperature regime]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, № 1(13), 88–110. [in Ukrainian].
9. Holovanov, V. I., Kriuchkov, H. I. (2021). Otsinka vohnestiikosti stalevykh konstrukttsii za normovanykh temperaturnykh rezhymiv pozhezhi [Assessment of fire resistance of steel structures under standardized fire temperature regimes. Fires and emergencies: prevention and elimination]. *Pozhezhi ta nadzvychaini sytuatsii: zapobihannia ta likvidatsiia*, 3, 52–60. [in Ukrainian].
10. Kovalov, A. I., Zobenko, N. V. (2016). Metodyka poperednoi otsinky vohnezakhysnoi zdatnosti pokryttiv dlia stalevykh konstrukttsii v umovakh temperaturnoho rezhymu vuhleводnevoi pozhezhi [The method of preliminary assessment of the fire protection ability of coatings for steel structures under the conditions of the temperature regime of a hydrocarbon fire]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, 1(1), 59–65. [in Ukrainian].
11. DSTU-N B V.2.6-211:2016. Proektuvannya stalevykh konstrukttsii. Rozrakhunok konstrukttsii na vohnestiikist [Design of steel structures. Calculation of structures for fire resistance]. Kyiv: Minrehion Ukrainy, 2016. 111 s. [in Ukrainian].
12. Krukovskiy, P. G. (1996). Obratnyye zadachi teplomassopere nosa (obshchiy inzhenernyy podkhod) [Inverse problems of heat and mass transfer (general engineering approach)]. Kyiv: Instytut tekhnichnoi teplofizyky NAN Ukrainy. [in Russian].
13. DSTU B V.1.1-4-98\*. Zakhyst vid pozhezhi. Budivelni konstrukttsii. Metody vyprobuvan na vohnestiikist. Zahalni vymohy (2005). [Fire protection. Building constructions. Test methods for firefighters. General requirement]. Kyiv: Derzhbud Ukrainy. 19 p. [In Ukrainian].
14. Chao Zhang, Adam Pintar, Jonathan M. Weigand, Joseph A. Main, Fahim Sadek (2021). Impact of variability in thermal properties of SFRM on steel temperatures in fire. *Fire Safety Journal*, 123, 103361. doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103361> [in English].

## INFLUENCE OF FIRE TEMPERATURE REGIME ON THE REQUIRED MINIMAL THICKNESSES OF FIRE-RETARDANT COATINGS FOR STEEL MEMBERS

S. Novak<sup>1</sup>, O. Dobrostan<sup>1</sup>, M. Pustovy<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Public Administration and Research in Civil Protection, Ukraine*

<sup>2</sup>*Cherkasy Institute of Fire Safety named after Heroes of Chornobyl of the National University of Civil Defense of Ukraine, Ukraine*

---

### KEYWORDS

fire-retardant coating, thermal conductivity, critical temperature of steel, minimal required thickness, nominal temperature-time curve, steel member, thermophysical properties

### ANNOTATION

The lack of data on the relationship between the values of the required minimal thickness of fire-retardant coatings for steel members, obtained for the conditions of fire exposure under the temperature regimes of hydrocarbon and external fire, and the values of this thickness for the nominal temperature-time curve of fire limits the scope of application of such fire-retardant materials. The objective of current study was to determine the influence of these nominal fire temperature regimes on the required minimal thickness of the fire-retardant coating for such load-bearing steel members as columns and beams, for wide ranges of changes in the thermophysical properties of the applicable fire-retardant material, the critical temperature of steel, the cross-sectional coefficient and the period of preservation fire resistance of steel member. The calculation method, which is based on the solution of the direct one-dimensional problem of thermal conductivity, determines the data on the required minimal thickness of fire-retardant coating for the temperature regimes of hydrocarbon and external fire and the data on the difference between these obtained values and the values of such thickness established for the temperature-time curve. It was established that the difference between the values of the required minimal thickness of fire-retardant coating for steel members, obtained for the conditions of fire exposure under the temperature regime of a hydrocarbon fire, and the values of this thickness determined under the temperature-time curve, has positive values (from 5.74% to 214%) , while for the conditions of fire exposure under the temperature regime of an external fire, they are negative (from -7.52% to -64.7%). This difference, both for the conditions of exposure to fire under the temperature regime of a hydrocarbon fire and for the conditions of exposure to fire under the temperature regime of an external fire, decreases with an increase in the coefficient of thermal conductivity of the applicable fire-retardant material, the coefficient of the cross-section and with a decrease in the critical temperature of steel. It is natural that with an increase in the time interval of preservation of the fire resistance of a steel member for the temperature regime of a hydrocarbon fire, the difference between the thicknesses decreases, and for the temperature regime of an external fire, it increases (by modulus).

УДК 614.843

## СТВОРЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВИПРОБУВАЛЬНОГО СТЕНДУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ОБМЕЖЕННЯ ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ ФАСАДАМИ БУДІВЕЛЬ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2.21-34>

Балло Я. В., ORCID iD 0000-0002-9044-1293

E-mail: 2801397@ukr.net

*Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Україна*

### ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

*Надійшла до редакції: 17.11.2022*

*Пройшла рецензування:  
20.11.2022*

### КЛЮЧОВІ СЛОВА:

обмеження поширення пожежі фасадами, обладнання з оцінки обмеження поширення пожежі, дослідження фасадних пожеж, пожежна безпека

### АНОТАЦІЯ

За результатами аналітичних досліджень наявних методів оцінювання обмеження поширення пожежі фасадами будівель виявлено недоліки, які можуть суттєво впливати на точність визначення їх пожежної безпеки. Обґрунтовано та встановлено основні конструктивні характеристики, яким має відповідати новий експериментальний стенд, з огляду на попередньо виявлені недоліки методик з оцінки ефективності поширення пожежі фасадами будівель. Наведено етапи створення експериментального випробувального обладнання та обґрунтовано вимоги до фізичних та механічних властивостей матеріалів, з яких виготовлено основні конструктивні елементи випробувального стенду. Здійснено верифікацію заявлених технічних характеристик випробувального стенду та зазначено його потенційні спроможності з відтворення реальних фрагментів фасадних систем. Описано основні параметри і процедури методики дослідження та оцінки поширення пожежі фасадами будівель, які планується реалізувати в межах використання нового експериментального стенду. Наведено перспективні напрями досліджень щодо удосконалення експериментального випробувального стенду для забезпечення більш точної оцінки ефективності обмеження поширення пожежі фасадами будівель за допомогою вогневих перешкоджувачів.

**Постановка проблеми.** Згідно з попереднім аналізом наявних методик оцінювання обмеження поширення пожежі фасадами будівель [1–2] доведено, що на сьогодні в країнах Європи, Азії, США немає єдиних підходів щодо методів та критеріїв, за якими визначають досягнення умов обмеження поширення пожежі фасадами будівель. Методики та випробувальні стенди відрізняються як за геометричними параметрами, так і за конструктивним виконанням, що значно впливає на результати проведеної оцінки пожежної безпеки фасадних систем. Недоліками наявних випробувальних стендів є неможливість врахування кута ухилу фасаду щодо вертикальної осі, а також відтворення лише прилеглого кута зі значенням  $90^\circ$ , що є досить

консервативним та може не забезпечити відтворення реальних конструктивних параметрів фасаду.

Крім того, важливим питанням у зазначеному контексті є реалізація дослідження щодо обмеження поширення пожежі фасадами за допомогою вогневих перешкоджувачів, а саме – протипожежних карнизів, протипожежних віконних штор та протипожежних поясів. Створення універсальної конструкції стенду, яка б давала можливість проводити оцінку фактичного стану можливості поширення пожежі для фасадів будівель та оцінку ефективності заходів щодо її обмеження за допомогою вогневих перешкоджувачів, є актуальною науковою задачею.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Дослідження [3] розкривають

проблеми оцінювання стійкості збірних систем фасадної теплоізоляції до поширення вогню, проте не враховують питання поширення пожеж між розташованими вище поверхами. Наукові розвідки [4] присвячені порівнянню характеристик випробувальних стендів, проте в них не враховується питання повноцінного відтворення геометричних та конструктивних параметрів досліджуваних фрагментів фасадних систем. У роботах [5–6] міститься порівняльний аналіз наявних методик проведення досліджень у сфері оцінки обмеження поширення пожежі фасадами будівель, проте у них не враховуються питання обґрунтування типу модельного вогнища пожежі та температурного режиму в об'ємі вогневої камери. Водночас всі перелічені критерії значно впливають на точність оцінки поширення пожежі фасадами будівель або оцінки заходів щодо її обмеження.

**Формулювання цілей досліджень.** Мета роботи полягає у підвищенні рівня оцінювання обмеження поширення пожежі фасадами будівель через обґрунтування відповідних конструктивних параметрів та створення удосконаленого експериментального випробувального стенду.

Для досягнення поставленої мети слід:

- на підґрунті попереднього аналізу методик дослідження пожежної небезпеки фасадних систем і оцінки заходів щодо обмеження поширення пожежі та прогнозування її поширення фасадами будівель визначити основні конструктивні характеристики, яким має відповідати стенд;

- обґрунтувати значення удосконалених конструктивних параметрів стенду, які запропоновано реалізувати в його конструктивному виконанні для забезпечення максимального наближення відтворення досліджуваного фрагмента фасаду;

- за результатом аналізу механічних властивостей матеріалів та показників, які характеризують здатність матеріалів чинити опір під навантаженням та

температурним впливом, визначити найбільш прийнятні матеріали під час створення стенду;

- на підґрунті попереднього аналізу наявних методик дослідження пожежної небезпеки фасадних систем обґрунтувати та визначити найбільш доцільний тип модельного вогнища пожежі, що застосовується під час проведення досліджень;

- обґрунтувати тип і кількість засобів та вимірювальної техніки випробувального стенду для отримання даних щодо проведення оцінки поширення пожежі фасадами будівель або її обмеження;

- на підґрунті отриманих даних створити експериментальний випробувальний стенд для виявлення закономірностей зміни температур на зовнішній поверхні вертикальних будівельних конструкцій та підтвердити фактичні значення параметрів, які відтворюються.

**Методи дослідження.** В роботі було використано методи узагальнення раніше виконаних досліджень щодо обґрунтування вимог до випробувального стенду з оцінки забезпечення обмеження поширення пожежі фасадами будівель; методи пошукового натурного експерименту. Також застосовано методи полігонних вогневих випробувань (за наявними методиками) для дослідження процесів теплообміну між джерелом пожежі та об'єктами, що піддаються впливу.

**Виклад основного матеріалу.** Попередній аналіз наявних методик дослідження пожежної небезпеки фасадних систем та оцінки заходів щодо обмеження поширення пожежі і прогнозування її поширення фасадами будівель [3] показав основні конструктивні характеристики, які має забезпечити удосконалений експериментальний стенд. З урахуванням недоліків методик, наведених у [6], розроблений експериментальний стенд для виявлення закономірностей зміни температур на зовнішній поверхні вертикальних будівельних конструкцій

(далі – випробувальний стенд) повинен мати такі удосконалені характеристики:

- рамно-каркасну основу для можливості монтажу фасадних систем різних типів та способів конструктивного виконання;

- досліджуваний фрагмент фасадної системи має забезпечувати можливість змінювати кут площини фасаду щодо вертикалі для імітації кутів ухилу фасадів будівель;

- у стенді має бути бокова рухома площа, що прилягає до основної частини фасадної системи з можливістю зміни кута прилягання для імітації кутових фасадів. Зазначена прилегла площа має змінювати кут прилягання від  $90^\circ$  до  $180^\circ$ ;

- у стенді має забезпечуватись можливість кріплення протипожежних карнизів або інших вогневих перешкоджувачів для обмеження поширення пожежі;

- у стенді має забезпечуватись можливість відтворення реальних параметрів міжвіконних простінків (як мінімальна, так і максимальна нормативна відстань) між поверхами згідно з вимогами чинних будівельних норм.

Слід відзначити, що на сьогодні відповідно до вимог [7–8] висота житлових або громадських приміщень має складати не менше 2,7 м від чистого рівня підлоги до рівня нижньої відмітки міжповерхового перекриття. У вимогах ряду Європейських будівельних вимог, а саме – [9–10], визначається, що мінімальна висота житлових приміщень повинна складати не менше 2,75 м. Допускається, як виняток, зменшувати висоту приміщень до 2,4 м за умови обладнання приміщень стаціонарними системами кондиціонування. Максимальні висоти приміщень житлового та громадського призначення фактично не обмежені, проте слід розуміти економічні аспекти, що стримують забудовників від збільшення висоти поверхів у будівлях. Окрім того, збільшення висоти поверхів збільшує відстань між нижніми та верхніми краями їх вікон, а відповідно позитивно впливає на обмеження швидкості поширення

фасадних пожеж. Таким чином, під час створення випробувального стенду слід забезпечити мінімально допустимі відстані між вікнами поверхів. Це один із критеріїв, який впливає на швидкість поширення пожежі зовнішніми фасадами будівель.

Відповідно до [11] мінімальні розміри вікон не повинні становити менше 1470 мм у ширину та 1460 мм у висоту.

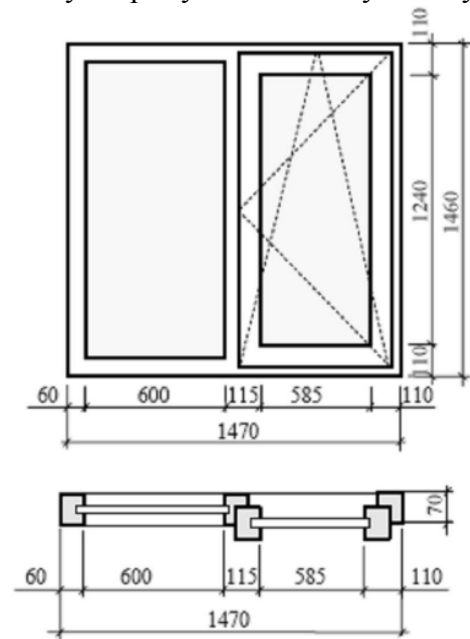


Рисунок 1 – Мінімальні геометричні розміри вікна для житлового приміщення за [11]

Джерело: розробка автора

Тобто із врахуванням товщини міжповерхового перекриття значення висоти міжвіконних простінків має становити не більше 1440 мм. Разом із тим слід розуміти, що сьогодні є скляні світлопрозорі фасади із прорізами у зовнішніх стінах, які фактично не мають міжвіконних простінків, а конструкція вікна виконує функцію ненесучої зовнішньої стіни, яка лише обмежує простір приміщення. Таким чином, під час створення випробувального стенду можна брати максимальну відстань між верхнім краєм вікна приміщення, де відтворюється пожежа, та вікном поверху, що розташоване над ним у межах 1400–1500 мм. На рис. 2 наведено принципову схему описаного параметра з максимальними та мінімальними геометричними розмірами.

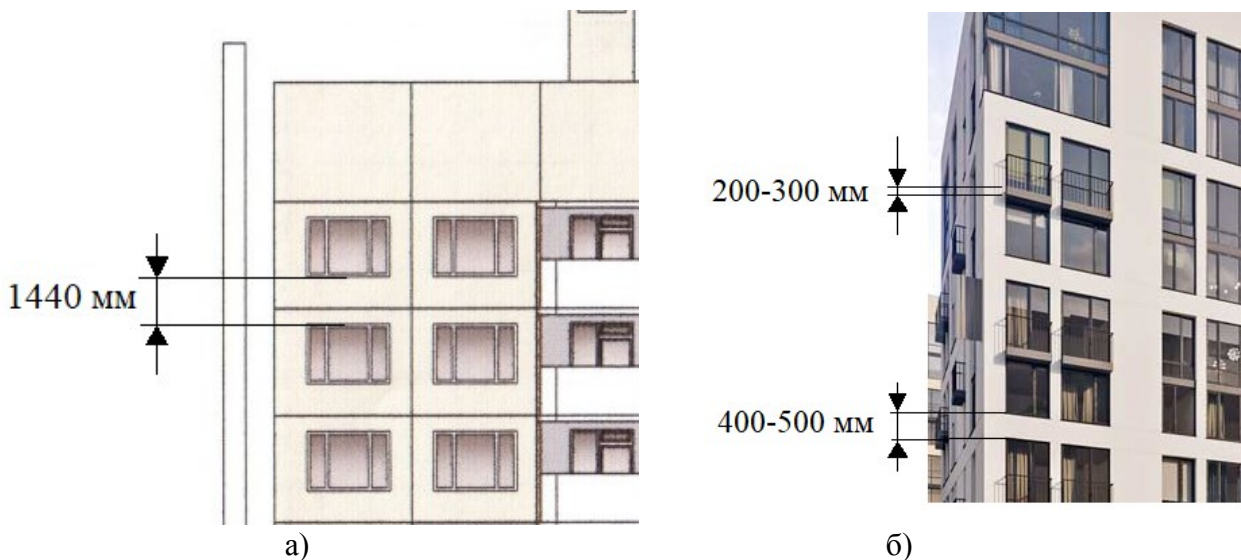


Рисунок 2 – Схематичні приклади поверхових міжвіконних простінків, де:

а) – максимальне значення висоти міжвіконного простінку, б) – мінімальні значення висоти міжвіконного простінку, виконаного за стилем «французькі вікна»

Аналіз методів оцінки пожежної небезпеки фасадних систем та заходів щодо забезпечення обмеження поширення пожежі ними не передбачає наявності можливих ухилів у фрагментах фасаду, або взагалі не враховує можливість виконання всієї фасадної системи під кутом щодо вертикальної площини. Разом із тим сучасна архітектура поєднує в собі широкий діапазон нових стилів та форм фасадних систем. Аналіз найбільш незвичайних сучасних будівель показує, що кути ухилу площини фасаду становлять  $15\text{--}20^\circ$ , а для більш поширених типових проєктів будівель ТРЦ або офісних будівель –  $5\text{--}8^\circ$  як для Європи, США та Азії, так і для України.

Наприклад, відома «Башта, що падає» (Capital Gate) в Абу-Дабі (ОАЕ) має кут нахилу будівлі  $18^\circ$ . Для порівняння: кут нахилу Пізанської вежі дорівнює всього  $4^\circ$ , тобто фактично у 4,5 рази менше [12].

Будівлі офісних хмарочосів висотою 114 м відомі як «Ворота Європи» (Puerta de Europa), що розташовані в Мадриді (Іспанія), мають ухил в  $14,3^\circ$  [13]. Штаб-квартира центрального телебачення Китаю із висотою будівлі 234 м має максимальне значення ухилу фасаду щодо

вертикалі  $6^\circ$  [14], а відомий Bella Sky Hotel, який розташований в Копенгагені (Данія), має максимальний ухил фасаду  $15^\circ$ .

На рис. 3 наведено зовнішній вигляд описаних унікальних будівель, що мають максимальні кути ухилу фасадних систем.

Таким чином, під час створення конструкції випробувального стенду слід забезпечити можливість зміни ухилу площини фасаду, для можливості відтворення реальних параметрів фасадних систем будівель у межах  $\pm 20^\circ$ , враховуючи, що на сьогодні немає даних щодо температурних розподілів від пожежі для фасадів із різним кутом ухилу площини.

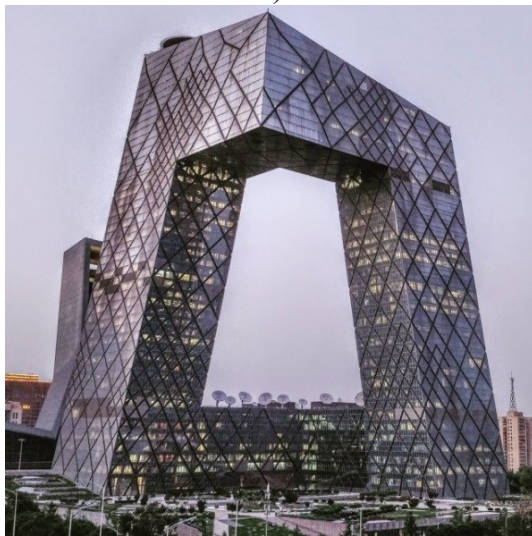
Серед однієї із особливих конструктивних характеристик для окремих стендів у межах методик дослідження пожежної небезпеки фасадних систем є наявність прилеглої фасадної площини під кутом  $90^\circ$ . Ширина прилеглої площини для середньомасштабних методик, зокрема методики [15], становить 600 мм, а для повномасштабних методик, зокрема [16–18], – у межах 1200–1800 мм. Враховуючи середньомасштабний розмір стенду, доцільно взяти ширину прилеглої площини 600 мм.



а)



б)



в)



г)

Рисунок 3 – Приклади офісних будівель, які мають ухил площини фасаду, де:  
а) – будівля «Башта, що падає»; б) – будівля «Ворота Європи»; в) – будівля штаб-квартири центрального телебачення Китаю; г) – будівля Bella Sky Hotel

Слід враховувати, що наведені вище методи випробувань мають дані теплових розподілів по досліджуваним фасадам тільки для прямого кута прилеглої площини. Разом із тим у практиці багатоповерхового будівництва найбільш поширені будинки за розташуванням секцій в плані, вони можуть бути рядовими, торцевими, поворотними й кутовими. Поворотні секції можуть мати різну форму: Г-подібну, Т-подібну, хрестоподібну, Z-подібну й ускладнену [19].

Блокування різних типів секцій дає можливість проектувати різноманітні за формою фасадів будинки, планувальне рішення яких допомагає одержати різноманітне планування квартир з

покращеними умовами інсоляції. Планувальна структура секцій з ускладненим периметром має низку функціональних переваг і дає змогу більш повно здійснювати архітектурні задуми. З погляду практики, більш складний план секції дає можливість, не подовжуючи комунікацій всередині секції, збільшити кількість квартир, що поліпшує техніко-економічні показники будівлі загалом.

Для односекційних та багатосекційних будинків характерним є застосування різноманітних планувальних схем: у формі трилисника, квадрата, хреста, трикутника, кола й більш складних форм. На рис. 4 наведено типові плани форм багатоповерхових будинків зі складною формою фасаду.



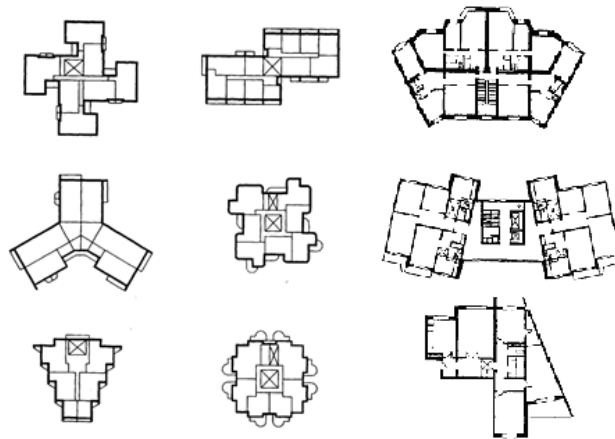


Рисунок 4 – Приклади планів типових складних форм фасадів будівель

На сьогодні у підходах щодо оцінки пожежної небезпеки фасадних систем та оцінки заходів щодо обмеження поширення пожежі не враховуються особливості складних форм компонування секцій та можливість їх суміжного прилягання під різними кутами.

Таким чином, конструкція випробувального стенду має забезпечити можливість дослідження зміни залежностей теплових розподілів по фасаді залежно від кута прилягання суміжної площини фасадів. Отримані дані нададуть змогу створити передумови для комплексної оцінки пожежної небезпеки фасадів різних типів і форм та спрогнозувати необхідні параметри заходів щодо забезпечення обмеження поширення пожежі.

З огляду на визначені критерії та конструктивні параметри за допомогою системи автоматизованого проєктування і креслення AutoCAD створено креслення випробувального стенду та його основних конструктивних компонентів.

На рис. 5 наведено аксонометричне креслення стенду.

На першому етапі фізичного створення випробувального стенду для проведення досліджень з виявлення закономірностей зміни температур на зовнішній поверхні вертикальних будівельних конструкцій виготовлено основну несучу раму, яка, окрім функції опорної основи, має виконувати функцію каркаса вогневої камери, де розміщується

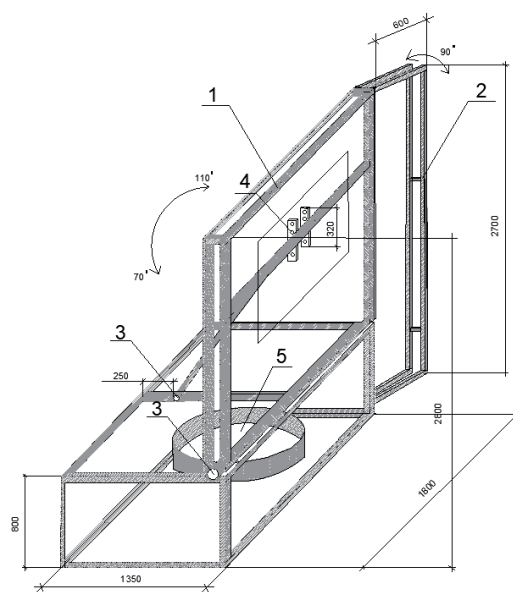


Рисунок 5 – Аксонометричне креслення стенду та його основних компонентів, де:

- 1) – основна рама для кріплення фрагмента фасадної системи;
- 2) – кутова прилегла рама для кріплення фрагмента фасадної системи;
- 3) – шарнір для регулювання кута встановлення площини фрагмента фасадної системи;
- 4) – фіксувальний гвинт;
- 5) – металеве деко модельного вогнища класу 8В.

*Джерело:* розробка автора модельне вогнище пожежі. Як матеріал каркаса взято сталеві газо-, водопровідні труби діаметром 50 мм з товщиною стінки 2,5 мм, які відповідають вимогам [20]. Вибір цього типу матеріалу для виготовлення основи стенду зумовлено високою міцністю виробу (номінальний тиск до 160 кгс/см<sup>2</sup>), а також стійкістю конструкції виробу до високих

температурних режимів (до 700°C) та згинальних зусиль, якщо немає динамічних навантажень. На рис. 6

наведено фото виготовленої основи випробувального стенду.



Рисунок 6 – Виготовлена основа конструкції випробувального стенду

*Джерело: розробка автора*

На другому етапі створення випробувального стенду із профільних труб з прямокутним перетином в 60×40 мм виготовлено основну та прилеглу рами для відтворення фасаду з розмірами 1800×2000 мм та 600×2700 мм відповідно. Нижня частина рами влаштовується на круглу трубу рами, що є основою стенду, утворюючи затиснений шарнір, який дає змогу рухати конструкцію рами щодо

вертикальної площини. Прилегла частина кутової рами для кріплення фрагмента фасадної системи встановлена на сталеві точені петлі розміром 32×120 мм із підшипником, що дає змогу змінювати кут повороту прилеглої рами від 90° до 180°.

На рис. 7 наведено загальний вигляд основної та прилеглої рами, встановленої на основу конструкції випробувального стенду.



Рисунок 7 – Загальний вигляд рамної конструкції випробувального стенду

*Джерело: розробка автора*

Для забезпечення зміни кутів ухилу основної та прилеглої рами щодо вертикальної площини, а саме – від  $70^\circ$  до  $110^\circ$ , і відповідно можливості їх фіксації в необхідному положенні розроблено конструкцію відповідного механізму. Принцип його роботи полягає у створенні одного затисненого лінійного шарніра (шарнірно-нерухома опора), що рухається в єдиній площині, та балки, яка

утримується у рівновазі за допомогою фіксувальних стрижнів. У конструкції основної рами влаштовано розподільчу пластину, що має отвори для фіксації балки у положеннях, що відповідають кутам ухилу рами в  $70^\circ$ ,  $80^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $100^\circ$  та  $110^\circ$  відповідно. На рис. 8 наведено креслення та зовнішній вигляд виготовленого механізму регулювання кута ухилу площини фасаду випробувального стенду.

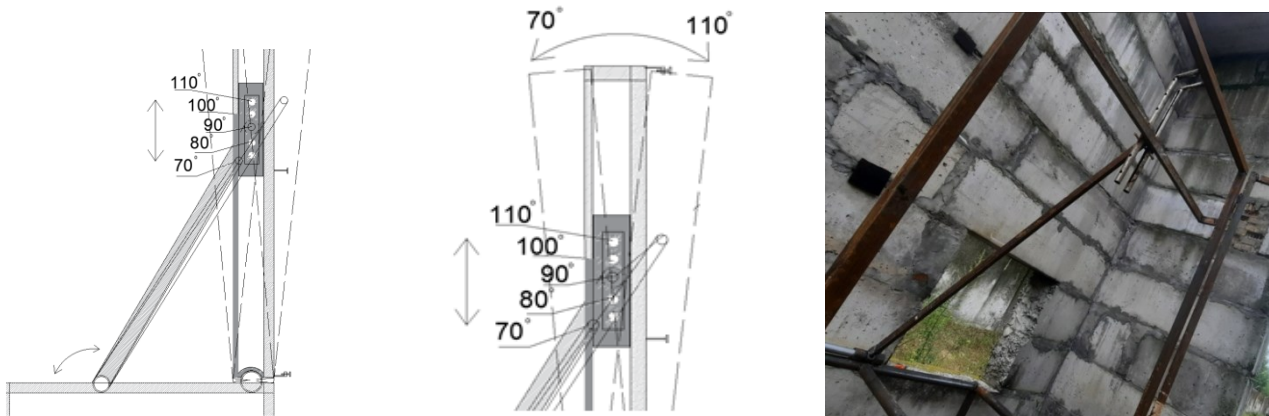


Рисунок 8 – Принципова схема креслень та зовнішній вигляд виготовленого регулювального механізму випробувального стенду

Наступним етапом є обґрунтування типу модельного вогнища пожежі для відтворення необхідного температурного режиму. Дослідження [21] та порівняльний аналіз модельних вогнищ класу А та В за стандартизованими методами [15; 16; 22] показав, що середня температура модельного вогнища пожежі класу А та В на рівні верхнього краю вогневої камери становила  $421^\circ\text{C}$  та  $744^\circ\text{C}$  відповідно. Водночас максимальне значення температури на рівні верхнього краю

вогневої камери для модельного вогнища пожежі класу А становили  $1130^\circ\text{C}$ , але упродовж не більше 4 хв із 20 хв випробувань. Для модельного вогнища пожежі класу В такі значення становили теж у межах  $1100\text{--}1150^\circ\text{C}$ , проте протягом не менше 12 хв.

У табл. 1 наведено порівняльні дані температурних режимів для методик [15; 16; 22] щодо різних класів модельних вогнищ пожежі.

Таблиця 1 – порівняльні дані температурних режимів у вогневих камерах за досліджуваними методами

Метод випробувань	Середнє значення температурного режиму у вогневій камері для модельного вогнища пожежі класу		Максимальне значення температурного режиму у вогневій камері	
	Клас А	Клас В	Клас А	Клас В
SP Fire	421	660	475	740
BS 8414 – 1	624	806	730	1100
DIN 4102-20	658	779	750	1130

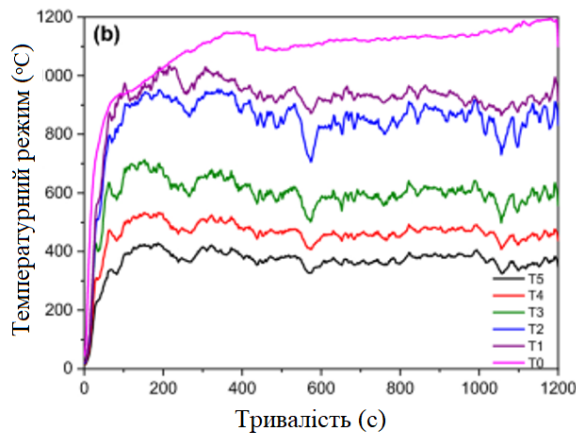
З огляду на міжнародно визнану методику [22] та аналіз даних, наведених у табл. 1 та [23] використання модельного вогнища пожежі класу В, а саме – 60 л

гептану або дизельного палива в квадратному чи круглому деці діаметром  $90\text{--}100$  см, є найбільш доцільним. Такий висновок зумовлено забезпеченням

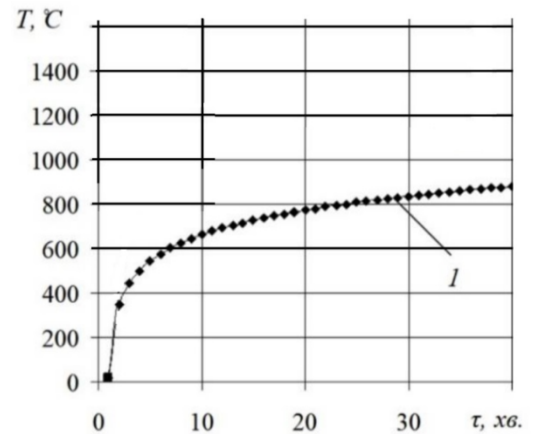
*Джерело:* розробка автора

стабільного режиму горіння та відповідно необхідного температурного режиму впливу (не менше ніж 600 °С упродовж 20 хв) на досліджуваний фрагмент фасаду. Окрім цього, аналіз температурного режиму у вогневій камері за методикою [22] у разі використання 60 л гептану чи дизельного палива та графіка стандартного температурного режиму за [24] демонструє, що у разі застосування цього

типу модельного вогнища пожежі створюються набагато жорсткіші умови температурного режиму для проведення випробувань. На рис. 9 наведено графіки термопар із температурними кривими під час проведення випробувань за методикою [22] у разі використання модельного вогнища пожежі класу В та графік стандартного температурного режиму пожежі за [24].



а)



б)

Рисунок 9 – Графіки температурних режимів, де:

а) – графіки термопар із температурними кривими під час проведення випробувань за методикою [22] у разі використання модельного вогнища пожежі класу В; б) – графік стандартного температурного режиму згідно з [24].

Таким чином, за результатом обґрунтування вибору модельного вогнища пожежі для відтворення необхідного температурного режиму взято модельне вогнище пожежі класу В із діаметром дека 95 см та 60 л гептану чи дизельного пального або іншого типу рідкого палива, що забезпечує температурний режим згідно з графіком рис. 9 (а) упродовж не менше 20 хв із загальних 30 хв тривалості випробувань.

Для створення вогневої камери, де розміщується модельне вогнище пожежі та забезпечується необхідний температурний режим упродовж визначеного часу, між несучими опорами стенду виконано закладання просвітів червоною повнотілою цеглою марки М-100, що відповідає вимогам [25]. Зі зворотного боку вогневої камери виконано два отвори розмірами 350 мм× на 50 мм для забезпечення сталого припливу кисню для

горіння модельного вогнища пожежі класу В. На рис. 10 наведено зовнішній вигляд вогневої камери випробувального стенду.



Рисунок 10 – Зовнішній вигляд вогневої камери випробувального стенду

Джерело: розробка автора

Оцінювання пожежної небезпеки фасадної системи або прогнозування заходів щодо її обмеження для того чи іншого фасаду здійснюється на основі критерію, що фасад будівлі виконано з

негорючих матеріалів. Це обґрунтовано згідно з чинними вимогами національних норм [7; 8; 26; 27], які висуваються до багатоповерхових будинків.

Як негорючий матеріал для відтворення конструкції фасаду використовуються газоблоки марки D400, де числове значення відповідає значенню густини виробу, а саме – 400кг/м<sup>3</sup> із розміром 600×100мм. Коефіцієнт теплопровідності газоблоків складає 0,11–0,13 Вт/м<sup>2</sup>°С у сухому стані, водопоглинання – 14%, теплопровідність – в межах 0,1–0,4 Вт/м<sup>2</sup>К. Серед переваг використання газоблоків у конструкції випробувального стенду є те, що на сьогодні цей тип будівельного матеріалу широко використовується в будівництві, в тому числі під час заповнення

міжкімнатних простінків та виконання зовнішніх ненесучих стін у монолітних бетонних будинках.

Аналіз недоліків методів, наведених у [6], показав, що важливим параметром, який має бути змінним, є значення висоти міжвіконних простінків між нижнім та верхнім поверхами, приклад яких залежно від розміру вікон наведено на рис. 2. Застосування газоблоків у конструкції випробувального стенду дає змогу змінювати геометричні параметри міжвіконних простінків залежно від типу конструкції фасадної системи, оцінку пожежної небезпеки якої слід провести. На рис. 11 наведено варіанти влаштування конструкцій міжвіконних простінків у випробувальному стенді.



Рисунок 11 – Зовнішній вигляд варіантів виконання міжвіконних простінків з різною висотою

*Джерело:* розробка автора

На фасадному боці випробувального стенду на рівні верхнього краю вогневої камери забезпечено можливість кріплення протипожежних карнизів різних типів, ширини та форми для проведення оцінки з обмеження поширення пожежі фасадом будівлі. Протипожежний карниз влаштовується на рівні верхнього краю вогневої камери та виготовляється із негорючих матеріалів, що зберігають свою цілісність за температурного режиму 800–900 °С упродовж не менше 30 хв. Як приклад, для виготовлення карниза можливо використовувати сталевий кут розміром 35×35 мм та піноблоки (цеглу). Ширина протипожежного карниза може

бути від 300 мм до 1500 мм, що задовольняє вимоги (Іспанія, Україна).

У роботах [6; 23] обґрунтовано місце розміщення термопар, за допомогою яких відбувається контроль температури на поверхні. Зазвичай для контролю температури на поверхні випробувального фрагмента фасаду влаштовуються термопари з розрахунку: 1 термопара на 50 см<sup>2</sup> площі фасадної системи. Таким чином, відповідно до схеми, наведеної на рис. 12, влаштовуються термопари та підключаються до вимірювально обчислювальної системи «Термококт».

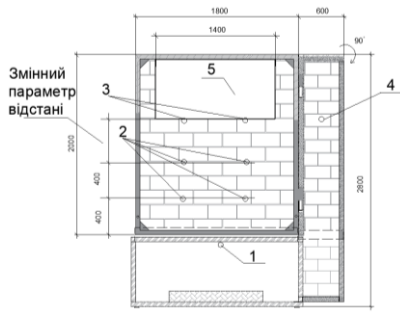


Рисунок 12 – Схема розміщення засобів вимірювальної техніки випробувального стенду

Джерело: розробка автора

Унаслідок проведеного аналізу методик дослідження пожежної небезпеки

фасадних систем та оцінки заходів щодо обмеження поширення пожежі і прогнозування її поширення фасадами будівель досягнуто необхідних конструктивних характеристик, яким має відповідати випробувальний стенд із урахуванням описаних недоліків методик у [6]. На рис. 13 наведено загальний вигляд виготовленого стенду та його конструктивні можливості трансформації для оцінки пожежної небезпеки фасадних систем та прогнозування обмеження поширення пожежі фасадами будівель.



Рисунок 13 – Загальний вигляд виготовленого стенду та його конструктивні можливості трансформації

Джерело: розробка автора

Серед удосконалених характеристик забезпечено універсальну рамно-каркасну основу стенду для можливості монтажу фасадних систем різних типів, а також забезпечено можливість змінювати кути площини фасаду щодо вертикалі та горизонталі для імітації різноманітних форм будівель. Стенд забезпечує можливість кріплення протипожежних карнизів для обмеження поширення пожежі та включає можливість відтворення реальних параметрів міжвіконних простінків (як мінімальну, так і максимальну нормативну відстань) між поверхами будівлі. Описані характеристики дають змогу більш точно

проводити оцінку обмеження поширення пожежі фасадами будівель із урахуванням попередньо виявлених недоліків методик.

**Висновки та напрями подальших досліджень.** На основі аналізу недоліків методик оцінки пожежної небезпеки фасадних систем та заходів щодо обмеження поширення пожежі визначено основні конструктивні характеристики, яким має відповідати удосконалений випробувальний стенд, та забезпечено їх практичну реалізацію.

Здійснено аналіз механічних властивостей матеріалів та показників, які характеризують здатність матеріалів

чинити опір під навантаженням та температурним впливом, і визначено найбільш практичні та економічно доцільні матеріали під час створення випробувального стенду.

З огляду на наявні методики дослідження пожежної небезпеки фасадних систем обґрунтовано найбільш доцільний тип модельного вогнища пожежі, що застосовується під час проведення досліджень. Прийнято модельне вогнище пожежі класу В із діаметром дека 95 см та 60 л дизельного пального або іншого типу рідкого палива, що забезпечує середній температурний режим не менше ніж 600 °С упродовж 20 хв із загальних 30 хв тривалості випробувань.

Обґрунтовано тип і кількість засобів та виміральної техніки випробувального стенду для отримання достовірних даних щодо температурного режиму на поверхні

досліджуваного фрагмента фасаду під час проведення оцінки поширення пожежі фасадами будівель або її обмеження.

Створено експериментальний випробувальний стенд для виявлення закономірностей зміни температур на зовнішній поверхні вертикальних будівельних конструкцій та підтверджено його спроможності й фактичні значення параметрів, які відтворюються. Подальші дослідження будуть спрямовані на проведення вогневих випробувань та отримання залежностей зміни температурного режиму на досліджуваному фрагменті фасадної системи згідно з її конструктивним виконанням. Отримані дані дають змогу здійснювати прогнозування пожежної небезпеки фасадів будівель та оцінку ефективності обмеження поширення пожежі фасадами будівель за допомогою вогневих перешкоджувачів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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* : міжнар. науково-практ. конф., м. Харків, 19 трав. 2022 р. Харків, 2022. С. 6–8.
2. 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*. № 40. 2022. С. 5–15.
3. Скоробагатько Т., Добростан О., Новак С. Аналіз європейських методів оцінювання стійкості збірних систем фасадної теплоізоляції до поширення вогню. *Цивільний захист та пожежна безпека*. 2020. Т. 9. № 1. С. 94–106.
4. Zhou B., Yoshioka H., Noguchi T., Wang K. Experimental study on vertical temperature profile of EPS external thermal insulation composite systems masonry façade fire according to JIS A 1310 method. *Fire and Materials*. 2020. doi :10.1002/fam.2880.
5. White N., Delichatsios M. Fire Hazards of Exterior Wall Assemblies Containing Combustible Components. Australia : Fire Protection Research Foundation, 10. 152 с.
6. Development of a European approach to assess the fire performance of facades : Lars Boström, Anja Hofmann-Böllinghaus, Sarah Colwell, Roman Chiva, Péter Tóth, Istvan Moder, Johan Sjöström, Johan Anderson, David Lange. European Commission B-1049 Brussels. June 2018. doi:10.2873/954759.
7. ДБН В.2.2-15:2019. Житлові будинки. Основні положення. [Чинний від 2019-12-01]. Вид. офіц. Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2019. 181 с.
8. ДБН В.2.2-9:2018. Громадські будинки та споруди. Основні положення. [Чинний від 2019-06-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2019. 43 с.
9. The Building Regulations 2020. Volume 2 – Buildings other than dwellinghouses Approved Document B (Fire safety). Ministry of Housing, Communities & Local Government and Department for Levelling Up, Housing and Communities URL : <https://www.gov.uk/government/publications/fire-safety-approved-document-b> (last accessed : 05.10.2022).
10. NFPA 5000 : Building Construction and Safety Code, 2018 Edition. URL: <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=5000> (last accessed : 05.10.2022).
11. ДСТУ-Н Б В.2.6-146:2010. Конструкції будинків і споруд. Настанова щодо проектування й улаштування вікон та дверей. [Чинний від 2011-07-01]. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2011. 106 с.
12. Edgard EI. Capital Gate. *Wikipedia : websait*. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Capital\\_Gate](https://en.wikipedia.org/wiki/Capital_Gate). (дата звернення : 05.10.2022).
13. Ortega P. Puerta de Europa. *Wikipedia : websait*. URL: [https://es.wikipedia.org/wiki/Puerta\\_de\\_Europa](https://es.wikipedia.org/wiki/Puerta_de_Europa). (дата звернення : 05.10.2022).
14. Fraioli P. CCTV Headquarters. *Wikipedia : websait*. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/CCTV\\_Headquarters](https://en.wikipedia.org/wiki/CCTV_Headquarters). (дата звернення : 05.10.2022).
15. ISO 13785-2:2002. Reaction-to-fire tests for façades. Part 2: Large-scale test. Geneva : International Organization for Standardization, 2002. 16 p.
16. BS 8414-1:2015. Fire performance of external cladding systems. Test method for non-loadbearing external cladding systems applied to the masonry face of a building. BSI, 2015. 20 p.
17. DIN 4102-20:2017. Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen. Teil 20: Ergänzender Nachweis für die Beurteilung des Brandverhaltens von Außenwandbekleidungen. GIS, 2017. 25 h.

18. ÖNORM B 3800-5:2013. Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen. Teil 5: Brandverhalten von Fassaden - Anforderungen, Prüfungen und Beurteilungen. Austrian Standards plus, 2013. 14 s.
19. Секційні житлові багатоповерхові будинки. URL : <https://helpiks.org/6-13908.html> (дата звернення : 05.10.2022).
20. ДСТУ 8936:2019. Труби сталеві водогазопровідні. Технічні умови. На заміну ГОСТ 3262-75 ; чинний від 2021-01-01. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2021. 51 с.
21. Y. Li, Z. Wang, X. Huang An Exploration of Equivalent Scenarios for Building Facade Fire Standard Tests. *Journal of Building Engineering*. 2022. 104399. doi.org/10.1016/j.job.2022.104399.
22. SP Fire 105 External wall assemblies and facade claddings. Reaction to fire. SP Technical Research Institute of Sweden, 1994. 16 p.
23. Zhou B., Yoshioka H., Noguchi T. et al. Fire Performance of EPS ETICS Facade : Effect of Test Scale and Masonry Cover. *Fire Technol* (2021). doi.org/10.1007/s10694-021-01195-x.
24. ДСТУ Б В.1.1-4-98. Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробування на вогнестійкість. Загальні вимоги. На заміну СТ СЭВ 1000-88 ; чинний від 2006-01-01. Вид. офіц. Київ : ДП УкрНДНЦ, 2006. 44 с.
25. ДСТУ Б В.2.7-61:2008. Будівельні матеріали. Цегла та камені керамічні рядові і лицьові. Технічні умови (На заміну ДСТУ Б В.2.7-61-97 ; чинний від 2009-07-01. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2009. 42 с.
26. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. [Чинний від 2017-06-01]. Вид. офіц. Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2017. 35 с.
27. ДБН В.2.2-41:2019. Висотні будівлі. Основні положення. [Чинний від 2020-01-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2019. 53 с.

## REFERENCES

1. 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 nauково-praktychnoi konferentsii*. Kharkiv: Natsionalnyi universytet tsyvilnoho zakhystu Ukrainy [in Ukrainian].
2. 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, 5-15. [in Ukrainian].
3. Skorobahatko, T., Dobrostan, O., Novak, S. (2020). Analiz yevropeyskykh metodiv otsiniuvannya stiikosti zbirnykh system fasadnoi teploizoliatsii do poshyrennia vohniu [Analysis of European methods for assessing the resistance of prefabricated facade thermal insulation systems to the spread of fire]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, 1 (9), 94-106. [in Ukrainian].
4. Zhou, B., Yoshioka, H., Noguchi, T., Wang, K. (2020). Experimental study on vertical temperature profile of EPS external thermal insulation composite system s masonry façade fire according to JIS A 1310 method. *Fire and Materials*, doi:10.1002/fam.2880. [in English].
5. White, N., Delichatsios, M. (2018). Fire Hazards of Exterior Wall Assemblies Containing Combustible Components. Australia: Fire Protection Research Foundation, 10. 152 s. [in English].
6. Lars Boström, Anja Hofmann-Böllinghaus, Sarah Colwell, Roman Chiva, Péter Tóth, Istvan Moder, Johan Sjöström, Johan Anderson, David Lange. (2018). Development of a European approach to assess the fire performance of facades: European Commission B-1049 Brussels. doi:10.2873/954759 [in English].
7. Residential buildings. Substantive provisions (2019). DBN V.2.2-15:2019. Kyiv: Ministerstvo rehionalnoho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy, 2019. 181 s. [in Ukrainian].
8. Public buildings and structures Basic provisions. (2018). DBN V.2.2-9:2018. Kyiv: Minrehion Ukrainy, 2019. 43 s. [in Ukrainian].
9. The Building Regulations. Volume 2 – Buildings other than dwellinghouses Approved Document B (Fire safety). (2020). Ministry of Housing, Communities & Local Government and Department for Levelling Up, Housing and Communities. Retrieved from <https://www.gov.uk/government/publications/fire-safety-approved-document-b> [in English].
10. Building Construction and Safety Code (2018). NFPA 5000: Edition Retrieved from <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=5000> [in English].
11. Konstruksii budynkiv i sporud. Nastanova shchodo proektuvannia y ulashtuvannia vikon ta dverei (2010). DSTU-N B V.2.6-146:2010. Kyiv : UkrNDNTs, 2011. 106 s. [in Ukrainian].
12. Edgard EI. Capital Gate. (2018). *Wikipedia: websait*. Retrieved from [https://en.wikipedia.org/wiki/Capital\\_Gate](https://en.wikipedia.org/wiki/Capital_Gate) [in English].
13. Ortega P. Puerta de Europa. (2017). *Wikipedia: websait*. Retrieved from [https://es.wikipedia.org/wiki/Puerta\\_de\\_Europa](https://es.wikipedia.org/wiki/Puerta_de_Europa). [in English].
14. Fraioli P. CCTV Headquarters. (2021). *Wikipedia: websait*. Retrieved from [https://en.wikipedia.org/wiki/CCTV\\_Headquarters](https://en.wikipedia.org/wiki/CCTV_Headquarters) [in English].
15. ISO 13785-2:2002. Reaction-to-fire tests for façades. Part 2: Large-scale test. Geneva: International Organization for Standardization, 2002. 16 p. [in English].
16. Fire performance of external cladding systems. Test method for non-loadbearing external cladding systems applied to the masonry face of a building (2015) BS 8414-1:2015. BSI, 2015. 20 p. [in English].
17. Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen. Teil 20: Ergänzender Nachweis für die Beurteilung des Brandverhaltens von Außenwandbekleidungen (2017). DIN 4102-20:2017. GIS, 2017. 25 h. [In German].
18. Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen. Teil 5: Brandverhalten von Fassaden – Anforderungen, Prüfungen und Beurteilungen (2014). ÖNORM B 3800-5:2013. Austrian Standards plus, 2013. 14 s. [In French].
19. Sektsiini zhytlovi bahatopoverkhovi budynky (2012). Retrieved from <https://helpiks.org/6-13908.html> [in Ukrainian].
20. Truby stalevi vodohazoprovodni. Tekhnichni umovy (2019). DSTU 8936:2019. Kyiv: UkrNDNTs, 2021. 51 s. [in Ukrainian].
21. Y. Li, Z. Wang, X. Huang (2022). An Exploration of Equivalent Scenarios for Building Facade Fire Standard Tests. *Journal of Building Engineering*, 104399. doi.org/10.1016/j.job.2022.104399 [in English].



22. External wall assemblies and facade claddings. Reaction to fire (1994). SP Fire 105. SP Technical Research Institute of Sweden, 16 r.
23. Zhou, B., Yoshioka, H., Noguchi, T. et al. Fire Performance of EPS ETICS Facade: Effect of Test Scale and Masonry Cover. *Fire Technol* (2021). doi.org/10.1007/s10694-021-01195-x [in English].
24. Fire protection. Building structures. Methods of testing for fire resistance. General requirements (1999). DSTU B V.1.1-4-98. K.: Ukrarkhbudynform, 1999. 21 s. [in Ukrainian].
25. Building materials. Bricks and stones ceramic ordinary and cast. Specifications (2008). DSTU B V.2.7-61:2008. Kyiv: UkrNDNTs, 2009. 42 s. [in Ukrainian].
26. Pozhezhna bezpeka ob'ektiv budivnytstva. Zahalni vymohy [Fire safety of construction sites. General requirements]. (2017). DBN V.1.1-7:2016. Kyiv: Ministerstvo rehionalnoho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy, 35 s. [in Ukrainian].
27. Vysotni budivli. Osnovni polozhennia [High-rise buildings. Basic provisions]. (2019). DBN V.2.2-41:2019. Kyiv: Minrehion Ukrainy, 2019. 53 s. [in Ukrainian].

## CREATION OF AN EXPERIMENTAL TEST BENCH WITHIN THE FRAMEWORK OF FIRE SPREAD LIMITATION RESEARCH BUILDING FACADES

Ya. Ballo

*Institute of Public Administration and Research in Civil Protection, Ukraine*

---

KEYWORDS	ANNOTATION
limitation of the spread of fire on facades, equipment for assessing the limitation of fire spread, research of facade fires, fire safety.	Based on the results of analytical studies of the existing assessment methods for ensuring the limitation of the spread of fire on the facades of buildings, shortcomings were identified that can significantly affect the accuracy of their fire safety assessment. The justification is provided and the main design characteristics that the new experimental stand must comply with are given, taking into account the previously identified shortcomings of the existing methods for assessing the effectiveness of the spread of fire on the facades of buildings. The analysis of examples of plans of typical complex forms of building facades, the reproduction of which is a potential task, was carried out. An axonometric drawing of the stand and its main components, based on which it is planned to reproduce its construction, is demonstrated. The stages of creation of experimental test equipment are presented and the requirements for the physical and mechanical properties of the materials from which the main structural elements of the test bench are made are substantiated. The justification of the type and dimensions of the model fire pit, which is used to reproduce the necessary temperature regime during research, has been carried out. Verification of the declared technical characteristics of the test bench was carried out and its potential capabilities of reproducing real fragments of facade systems were given. The main parameters and procedures of the method of research and assessment of the spread of fire on the facades of buildings, which are planned to be implemented within the framework of the use of a new experimental stand, are described. Prospective directions of research regarding the improvement of the experimental test bench to ensure a more accurate assessment of the effectiveness of limiting the spread of fire on the facades of buildings with the help of fire barriers are presented.

УДК 614.841:536.46

## PREVENTION OF PREVIOUS OPERATION OF CHARGES OF PYROTECHNICAL PRODUCTS BASED ON MIXTURES OF MAGNESIUM, ALUMINUM POWDER AND METAL WASTE IN THE CONDITIONS OF EXTERNAL THERMAL ACTIONS

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2.35-43>

Kyrychenko Ie., ORCID iD 0000-0001-7638-0722

Kyrychenko O., ORCID iD 0000-0002-0240-1807

Hvozd V., ORCID iD 0000-0003-2277-7972

Diadiushenko O.\*, ORCID iD 0000-0003-0797-2251

\*E-mail: [oleksandr\\_diadiushenko@chipb.org.in](mailto:oleksandr_diadiushenko@chipb.org.in)

*Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chornobyl Heroes of National University of Civil Defense of Ukraine, Ukraine*

### ABOUT ARTICLE

*Надійшла до редакції: 25.08.2022*

*Пройшла рецензування: 30.09.2022*

### KEY WORDS:

fire safety, pyrotechnic products, pyrotechnic mixtures, external thermal effects

### ANNOTATION

Mathematical models of external heating of charges of pyrotechnic products based on compacted mixtures of aluminium-magnesium alloy powders and nitrate-containing oxidizers (sodium, potassium, strontium, and barium nitrates) were refined by taking into account the temperature dependence of their thermophysical properties (volumetric heat capacity and coefficient of thermal conductivity), which allowed to more accurately determine the critical values of heat flows and durations of their influence [1–2]. New data were obtained to determine the critical ranges of the change in the burning rate of mixtures under conditions of elevated heating temperatures and external pressures for various values of technological parameters (the coefficient of excess oxidizer  $\alpha$ ; the average particle size of metal fuel powders  $d_m$  microns and oxidizer  $d_N$ ), exceeding the ranges of which leads to premature ignition mixtures under conditions of external thermal effects and leads to unstable explosive development of their combustion process and fire-hazardous destruction of pyrotechnic products

**Problem statement.** Pyrotechnic products (PP) based on compacted two-component mixtures of aluminum-magnesium alloys (AMA) and nitrate-containing oxidizers (sodium, potassium nitrates, etc.) are widely used to organize the burning process of multicomponent pyrotechnic mixtures. These mixtures are widely used in the national economy and military equipment [3–4]. AMA mixtures are equipped with products for various purposes (illuminating cartridges and artillery shells, photo-illuminating aerial bombs, signal projectiles, pyrotechnic IR projectiles (infrared targets-traps of modern thermally guided missiles, etc. [5–6])). At the same time, the products may be exposed to intense external thermal effects during storage, transportation and use. The surfaces of the products in such

conditions are exposed to significant local heaters, which leads to the premature activation of PV charges and the acceleration of the burning process under conditions of elevated heating temperatures, external pressures, etc., which in turn leads to fire-hazardous destruction of the products, ignition of surrounding objects, human victims, and causes significant material losses.

Therefore, an urgent problem is the development of methods to prevent the occurrence of forced fire-hazardous destruction of pyrotechnic products in the event of exposure to external thermal effects. For the development of such methods, it is necessary to have the results of studies of the processes of external heating, ignition and development of combustion of compacted

mixtures that make up the basis of pyrotechnic products, with the determination of their explosive modes of flow under different external conditions.

The relevance of this work lies in the fact that, based on the developed models, the premature triggering of pyrotechnic products based on mixtures of magnesium powders, aluminium and metal oxides is eliminated under conditions of external thermodynamics.

**Analysis of recent research and publications.** Data on the interaction of aluminium, zirconium, and titanium powders with environmental oxygen are presented in [7]. It was established that they ignite under heating conditions. At the same time, the ignition temperature of metals significantly depends on their dispersion ( $d_M = 5...310$  microns), the relative concentration of oxygen in the environment ( $C_{O_2} = 0,21(\text{air})...0.8$ ) and can vary in the range of 700...1900 K. The influence of ambient pressure on the process of their ignition, as well as the behaviour of the considered AMA powders, was not investigated.

The work [8] provides data on the influence of the dispersion of high-energy metals (magnesium, aluminium), as well as their content in pyrotechnic compositions based on a nitrate-containing oxidizer (ammonium nitrate). It is shown that an increase in the dispersion of the metal powder (for example, by 3...4 times - for magnesium and by 5...6 times - for aluminium) leads to explosive ignition of the specified compositions for the ratio of components close to stoichiometric (the coefficient of excess oxidant  $\alpha = 1,0$ ). At the same time, replacing aluminium with magnesium only contributes to the explosive ignition of compositions. The process of the behaviour of the considered AMA powders in decomposition products of other nitrate-containing oxidants (for example, sodium, potassium nitrates, etc.) has not been investigated.

Data on the ignition of pyrotechnic mixtures based on aluminium powders by a laser beam are presented in [9]. The critical parameters of laser radiation (power, action time, wavelength) that lead to focal ignition

of mixtures have been established. It is shown that increasing the dispersion of aluminium powder (for example, by 3...4 times) reduces the ignition delay of mixtures by 1.5...2 times. At the same time, the influence of environmental parameters (oxygen content, heating temperature, external pressure) on the ignition process of mixtures was not considered. There are no similar studies for mixtures based on AMA powders. At the same time, the simulation of the heating process is considered only in a narrow zone of the laser beam, and not over the entire surface of the mixtures, as is the case, for example, in the case of fires in warehouses or when launching products with the considered pyrotechnic products.

The work [10] presents a study of the ignition mechanism of ultrafine aluminium powders in the decomposition products of pyrotechnic compositions on ammonium perchlorate. It was established that the ignition process of an individual metal particle begins on its surface, and then, after melting aluminium, passes into the gas phase. Comparison of the results of the calculations of the dependences of the ignition temperature of a metal particle on its size and the oxygen content in the decomposition products with the experiment showed their complete correspondence (the relative error does not exceed 5...7%). At the same time, the influence of ambient temperature and external pressure on the processes of ignition of ammonium particles remained unresolved. In addition, ignition processes of other high-energy metals (for example, magnesium, AMA) in decomposition products of not only ammonium perchlorate, but also nitrate-containing oxidants have not been investigated.

New data on the behaviour of magnesium powders in active gaseous media (oxygen, air, etc.) and in pyrotechnic mixtures with oxygen-containing oxidants under their heating conditions (for example, during fires in warehouses, during transportation, etc.) are presented in [11]. The dependence of the temperature and ignition delay of magnesium powders on their dispersion has been established. So, for example, when the

average size of metal particles increases by 4...5 times, the ignition temperature and the delay time in air decrease by 2...2.5 times. Ignition of magnesium powders in mixtures with oxidants occurs in their decomposition products and is subject to the same laws. At the same time, the effect of the nature of the oxidant due to the relative oxygen content in their decomposition products was not investigated. The effect of temperature, pressure and composition of the environment on the specified ignition characteristics of magnesium powders has also not been clarified. There are no specified studies for AMA powders either.

Data on the ignition of high-energy pyrotechnic compositions based on ultrafine powders of metals (magnesium, aluminium, zirconium) and ammonium perchlorate are provided in [12]. It was established that the ignition of metals occurs in the decomposition products of the oxidizer and depends significantly on the dispersion of metal powders. Thus, with an increase in their dispersion, for example, by 3...5 times, their ignition temperature decreases by 2.5...3 times and lies in the range of 600...1900 K. The influence of the composition and environmental pressure on the ignition of the considered metals has not been considered. Also, the ignition process of AMA powders under the specified conditions has not been investigated.

Data on the ignition of high-energy pyrotechnic compositions based on ultrafine powders of metals (magnesium, aluminium, zirconium) and ammonium perchlorate are provided in [12]. It was established that the ignition of metals occurs in the decomposition products of the oxidizer and depends significantly on the dispersion of metal powders. Thus, with an increase in their dispersion, for example, by 3...5 times, their ignition temperature decreases by 2.5...3 times and lies in the range of 600...1900 K. The influence of the composition and environmental pressure on the ignition of the considered metals has not been considered. Also, the ignition process of AMA powders under the specified conditions has not been investigated.

Data on the ignition of solid metallized fuels based on aluminium and titanium powders are presented in [13]. It was established that the ignition temperature of fuels significantly depends on the ratio of components, the dispersion of metal fuel powders ( $d_m$ , microns) and the coefficient of excess oxidant ( $\alpha$ ). Thus, an increase in  $d_m$  by 5...6 times and  $\alpha$  from 0.2 to 0.8 leads to a decrease in the ignition temperature by 2...3 times, and the range of its change is 1000...2000 K. There are no data on the ignition delay time of fuels, the effect on the characteristics their exposure to external conditions (temperature of heating, composition and pressure of the environment, etc.). The specified studies have not been conducted for fuels based on pyrotechnic mixtures based on AMA powders.

The paper [14] provides a comparative analysis of the combustion development rates of pyrotechnic compositions based on ultrafine aluminium powders. It has been established that the coefficient of excess oxidant in the mixture, the dispersion of aluminium powders and oxygen-containing oxidants (perchlorates, chlorates, etc.) have a significant influence on their burning speed. A decrease in the dispersion of the metal fuel and oxidizer by 3...4 times leads to an increase in the burning rate by 1.5...3 times for  $\alpha = 1,0$ . When  $\alpha$  increases from 0.6 to 1.5, the burning rate decreases by 1.5...2 times. There are no studies of the effect of heating temperature and external pressure on the burning rate of the considered mixtures. There are no data on the burning rates of mixtures based on AMA powders.

The paper [15–16] provides data on the main characteristics of the flames of solid pyrotechnic compositions based on aluminium powders and ammonium perchlorate (on the temperature  $T_b$  and the composition of combustion products, the content of high-temperature condensate  $g_c$ , etc.). It was established that the specified characteristics depend most significantly on the ratio of components in the initial mixtures. So, for example,  $T_b$  has maximum values in the range of 3500...4500 K at  $\alpha = 0.9...1.0$ , and value = 0.5...0.7 at  $\alpha = 0.2...1.5$ . There are

no data on the characteristics of flames of compositions based on mixtures of AMA powders.

In [17], the dependence of the speed and limit modes of combustion of two-component mixtures of titanium powders and nitrate-containing oxidizers ( $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ ) on technological parameters under conditions of elevated heating temperatures and external pressures was investigated. It was established that an increase in the heating temperature to 800 K and external pressure to 107 Pa leads to an increase in the burning rate by 1.5...3.5 times. An increase in the coefficient of excess oxidant from 0.35 to 1.4, as well as the average particle size of titanium powder from 45 microns to 280 microns and oxidant from 50 microns to 140 microns reduce its value by 2...4 times. On the basis of the obtained data, experimental-statistical models were developed to determine the unstable modes of development of combustion of the considered nitrate-titanium mixtures under the specified conditions. There are no similar data for nitrate pyrotechnic mixtures based on AMA powders.

Thus, currently there are no data on the developed mathematical models of external thermal effects on the charges of pyrotechnic products, which allow determining the critical values of their parameters (for example, heat flows, their action times, etc.), exceeding which can lead to their premature ignition and the development of an explosive combustion. There is also very limited or no information on the main characteristics of the combustion process of pyrotechnic products (temperature and ignition delay time of metal fuel particles in the decomposition products of oxidizers, the speed of development of the combustion process of products) under conditions of elevated heating temperatures and external pressures, which are realized in the case of premature activation of products. This significantly limits the possibilities of building adequate experimental and statistical models for determining the critical ranges of change in the burning rate of the considered products, which do not lead to an unstable explosive course of the burning process under the mentioned conditions.

Therefore, at the moment, there are no scientifically based methods for preventing the premature activation of pyrotechnic products based on mixtures of AMA powders with the subsequent explosive development of their combustion, which leads to fire-hazardous destruction of pyrotechnic products during their storage, transportation and launch (thermal shock effects in the conditions of a shot and flight).

**The purpose of the article.** The purpose of this work is to establish the main regularities of the processes of heating, ignition and combustion development of pyrotechnic products based on mixtures of AMA powders. Such studies make it possible to develop mathematical and experimental-statistical models for determining critical ranges of changes in the parameters of external thermal actions and rates of development of combustion of pyrotechnic mixtures, exceeding which can lead to premature ignition and explosive development of combustion of pyrotechnic mixtures, fire-hazardous destruction of products. Determining these ranges at the stages of manufacturing pyrotechnic products and bench tests of products will prevent their premature activation and the occurrence of fires in the event of external thermal effects.

**Research methods.** To study the influence of elevated heating temperatures (up to 800 K) and external pressures (up to 107 Pa) on the processes of ignition and development of combustion of pyrotechnic products, the following methods were used [3]: modern methods of physical and chemical analysis (film and microfilming methods, X-ray analysis methods, non-contact and contact methods of temperature measurement), methods of nonlinear thermal conductivity and thermal resistance, as well as mathematical and experimental-statistical modelling, mathematical and experimental-statistical modelling, standard pyrotechnic equipment for testing samples of pyrotechnic products under the specified conditions.

Calculations according to the models are carried out in real-time and dialogue mode using computer equipment that meets modern requirements for the use of special software.

**Presenting main material.** Thermal calculations are based on a complex of non-linear non-stationary mathematical models, which were refined by taking into account the shape and dimensions (flat layer, cylindrical layer), temperature dependence of the thermophysical properties of the PS (volumetric heat capacity  $CV(T) = CV_0 \cdot Tv$  and thermal conductivity coefficient  $\lambda(T) = \lambda_0 \cdot Tv$ , де  $CV, \lambda_0, v$  – are empirical constants [3]). Moreover, only heat exchange by heat transfer was taken into account (convective and radiant types of heat

exchange were not considered due to their insignificance [2–3]).

To calculate the process of heating the charges of pyrotechnic products, standard equations of thermal conductivity were used, which were refined by the authors by taking into account the geometric dimensions of the charges and the dependences of  $CV(T)$  та  $\lambda(T)$ . Using the standard method of integral Fourier transformations [2], analytical expressions for determining temperature distributions in the considered mixtures were obtained from model equations (Table 1).

Table 1 – Analytical expressions for determining the temperature distribution in charges of pyrotechnic products ( $q_n = q_{n0} = \text{const}$ )

Pyrotechnic Mixture	Analytical Expression for Determining the Temperature Distribution
A flat layer on the end surface of the mixture charge	$T(z,t) = \left( T_0^{v+1} + \frac{(v+1) \cdot q_{n0}}{\lambda_0} \cdot \left[ \frac{a_0^2 \cdot t}{H} + \frac{3z^2 - H^2}{6H} + \frac{2H}{\pi^2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \cdot \frac{\cos \frac{\pi n z}{H}}{n^2} \cdot e^{-\left(\frac{\pi a_0 n}{H}\right)^2 \cdot t} \right] \right)^{\frac{1}{v+1}}, n = 3 \dots 5$
Cylindrical layer on the side surface of the mixture charge	$T(r,t) = T_0^{v+1} + \frac{(v+1) \cdot q_{n0} \cdot R_2}{\lambda_0} \cdot \left[ \frac{R_2^2 \cdot t}{R_2^2 - R_1^2} \cdot \left( \frac{2a_0^2 \cdot t}{R_2^2} - \frac{1}{4} \cdot \left( 1 - \frac{r^2}{R_2^2} \right) - \frac{R_1^2}{R_2^2} \cdot \left( \ln \frac{r}{R_1} + \frac{R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \cdot \ln \frac{R_1}{R_2} + \frac{3}{4} \right) \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\pi}{\mu_n} \cdot \frac{I_1\left(\mu_n \cdot \frac{R_1}{R_2}\right) \cdot I_1(\mu_n)}{I_1^2\left(\mu_n \cdot \frac{R_1}{R_2}\right) - I_1^2(\mu_n)} \cdot \left( I_0\left(\mu_n \cdot \frac{r}{R_2}\right) \cdot Y_1\left(\mu_n \cdot \frac{R_1}{R_2}\right) - Y_0\left(\mu_n \cdot \frac{r}{R_2}\right) \cdot I_1\left(\mu_n \cdot \frac{R_1}{R_2}\right) \right) e^{-\left(\frac{\mu_n \cdot a_0}{R_2}\right)^2 \cdot t} \right]^{\frac{1}{v+1}}, n = 5 \dots 7$

Note.  $r, z, t$  – coordinates and time of thermal exposure;  $T_0, a_0^2, H$  – initial temperature, coefficient of thermal conductivity and thickness (for a flat layer) of PP charge;  $R_1, R_2$  – inner and outer radii of the cylindrical layer;  $I_0, I_1, Y_0, Y_1$  – Bessel functions;  $\mu$  are the roots of the characteristic equation  $I_1\left(\mu \cdot \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot Y_1(\mu) = Y_1\left(\mu \cdot \frac{R_1}{R_2}\right) \cdot I_1(\mu)$ .

At the same time, the time of thermal exposure is  $t = 30 \dots 45$  s. At  $t \geq 50 \dots 70$  s, there is a sharp increase in  $T_{\Pi}$  (more than 10...15 times).

Determination of critical values of thermodynamic parameters taking into account the temperature dependence of thermophysical properties of products.

Actions with critical values of heat flows  $q_n$  from external heat sources and their action times  $t^*$  are accepted as fire-explosive thermal effects on the surface of pyrotechnic products. In this case, the surface temperature of the charges  $T_{\Pi}$  satisfies the condition:  $T_{\Pi} > T_3$ , where  $T_3$  is the ignition temperature at which the process of exothermic oxidation of magnesium and aluminium powder particles in the gaseous products of thermal decomposition of the oxidizer begins.

As a result of the conducted research (Figs. 1, 2) it was established that the increase in heat flow leads to an increase in the surface temperature of the charge  $T_{\Pi}$  by 3...4 times.

Research of burning speed and development of experimental and statistical models.

On the basis of the conducted experimental studies (Figure 3), it was established that an increase in the heating temperature  $T_0$  from 300 K to 800 K and the external pressure  $P$  from 105 Pa to 107 Pa leads to an increase in the burning rate of products by 1.5...2 times. At the same time, an increase in the coefficient of the excess of the

oxidizer  $\alpha$  from 0.3 to 2.5, the average particle size of metal fuel powder  $d_m$  from 38.5 microns to 385 microns, and the oxidizer  $d_N$  from 50 microns to 140 microns reduce its value by 1.4...3, 7 times.

New experimental and statistical models (relative error 3...5%) have been developed to determine the critical values of combustion rates of mixtures under conditions of elevated heating temperatures and external pressures:

$$u(T_0, P) = C_0 + C_1 P + C_2 T_0 + C_3 P^2 + C_4 T_0^2 + C_5 P^3 + C_6 P T_0 + C_7 P T_0^2 + C_8 P^2 T_0 + C_9 P^2 T_0^2 + C_{10} P^3 T_0 + C_{11} P^3 T_0^2, \quad (1)$$

де  $C_j$  ( $j = \overline{0, 11}$ ) – empirical coefficients that depend on the ratio of components, their dispersion and the nature of the oxidant.

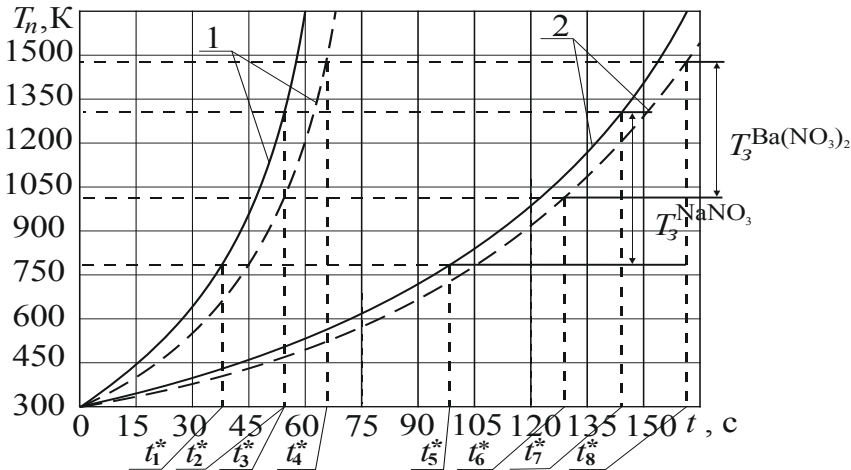


Figure 1 – Dependencies of the temperature of the surface of the products in the form of a flat layer on the external heat flow  $q_n$  and its action time  $t$ :

1 –  $q_n = 2,9 \cdot 10^6 \text{ W/m}^2$ ; 2 –  $q_n = 1,7 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$ ; – AMA mixture +  $\text{NaNO}_3$ ; – AMA mixture +  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ ;  
 $T_b^{\text{NaNO}_3}$ ,  $T_b^{\text{Ba}(\text{NO}_3)_2}$  – ignition temperature of AMA particles in decomposition products  $\text{NaNO}_3$  and  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$

Developed: summarized by the authors

It follows from Figure 1, 2 that at certain critical values of the parameters of external thermal actions  $q_n$  and  $t_j^*$  ( $j = \overline{1, 16}$ ) the surface temperature of the charges of pyrotechnic products begin to exceed the temperature ignition of  $T_b$  particles of AMA in decomposition products of oxidants. This leads to their rapid ignition (within  $3 \cdot 10^{-3}$ ... $5 \cdot 10^{-3}$  s) and the rapid development of the burning process of pyrotechnic products under conditions of elevated heating temperatures and external pressures. At the same time, for a more

accurate determination of the  $q_n$  and  $t_j^*$  parameters, the ranges of  $T_b$  changes were obtained depending on the considered technological parameters ( $\alpha = 0.3 \dots 2.5$ ;  $d_m = 38.5 \dots 385$  microns ;  $d_N = 50 \dots 140$  microns) and parameters of the external environment ( $T_0 = 300 \dots 800$  K;  $P = 105 \dots 107$  Pa):

$$\begin{aligned} T_b^{\text{KNO}_3} &= 800 \dots 1370 \text{ K}; \\ T_b^{\text{Sr}(\text{NO}_3)_2} &= 950 \dots 1460 \text{ K}; \\ T_b^{\text{Ba}(\text{NO}_3)_2} &= 1070 \dots 1490 \text{ K}. \end{aligned}$$

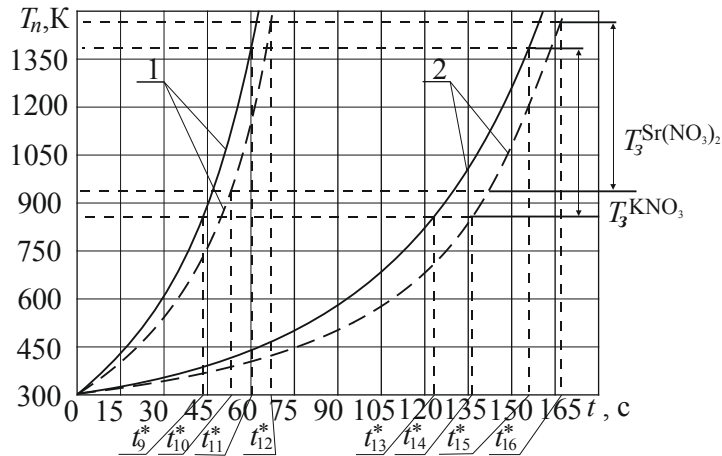


Figure 2 – Dependencies of the temperature of the surface of products in the form of a cylindrical layer on the external heat flow  $q_n$  and its action time  $t$ : 1 –  $q_n = 2,9 \cdot 10^6 \text{ W/m}^2$ ; 2 –  $q_n = 1,7 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$ ; – AMA mixture +  $\text{KNO}_3$ ; – AMA mixture +  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ ;  $T_3^{\text{KNO}_3}$ ,  $T_3^{\text{Sr}(\text{NO}_3)_2}$  – ignition temperature of AMA particles in decomposition products  $\text{KNO}_3$  and  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$

*Developed:* summarized by the authors

From the data presented in Figure 3, it follows that with an increase in the content of nitrate-containing oxidant ( $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ ) in pyrotechnic products, the burning rate of the mixture decreases. This indicates that by adjusting these technological parameters at the stage of manufacturing charges of pyrotechnic products, it is possible to increase the stability of the development of their burning process.

The obtained experimental-statistical models (1) make it possible to comprehensively assess the impact of technological parameters on the critical values of the speed of development of burning charges of pyrotechnic products in conditions of elevated heating temperatures and external

pressures in dialogue mode and in real time with the help of computer support.

In conclusion, it should be noted that on the basis of the developed mathematical and experimental-statistical models, it is possible to develop a scientifically based method for determining the critical ranges of changes in the parameters of external thermal effects on the charges of pyrotechnic products and the development rates of their burning process in these conditions. Based on this method, controls and technological recommendations can be developed that increase the fire safety of pyrotechnic products based on mixtures of magnesium, aluminium and metal oxide powders that are manufactured.

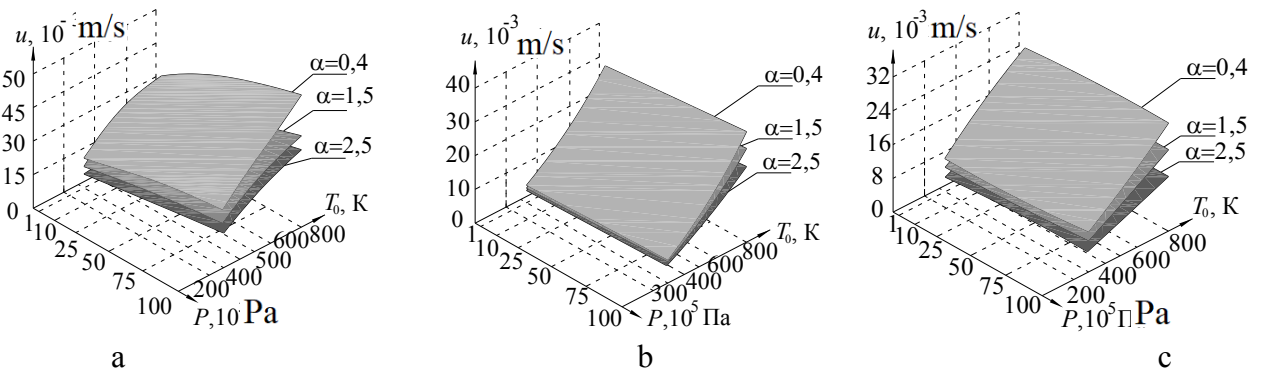


Figure 3 - Dependence of the burning rate of products on the heating temperature and external pressure for equal values of the oxidant excess coefficient ( $d_m = 35.8 \text{ microns}$ ,  $d_N = 140 \text{ microns}$ ): a) – AMA mixture +  $\text{NaNO}_3$ ; b) – AMA mixture +  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ ; c) AMA mixture +  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$

*Developed:* summarized by the authors



**Conclusions and directions for further research.** Mathematical models of external heating of charges of pyrotechnic products based on mixtures of AMA powders were developed by taking into account different geometric shapes (flat and cylindrical layers). The temperature dependence of the thermophysical properties of mixtures is also taken into account. The established allows to more accurately determine the critical values of heat flows and the duration of their influence (the relative error has been reduced to 5...7% instead of 10...12% in existing models). This allows you to prevent premature activation and fire-hazardous destruction of products.

1. New experimental data were obtained on the dependence of the combustion rate of mixtures on the technological parameters (coefficient of excess oxidizer  $\alpha$ , dispersion of metal fuel  $d_m$  and oxidizer  $d_N$ ) and external conditions (heating temperature  $T_0$  and external pressure  $P$ ). It was found that increasing  $\alpha$  from 0.3 to 2.5,  $d_m$  from 35.8 microns to 385 microns,

and  $d_N$  from 50 microns to 140 microns reduce its value by 1.4...3.7 times.

2. For the first time, experimental and statistical models were developed to determine (with a relative error of 3...5%) the critical ranges of change in the burning rate of mixtures under conditions of elevated heating temperatures (up to 800 K) and external pressures (up to 107 Pa) depending on the ranges of changes in technological parameters:  $\alpha = 0.3...2.5$ ,  $d_m = 35.8...385$  microns and  $d_N = 50...140$  microns. Exceeding these ranges leads to explosive development of combustion under conditions of external thermal effects and fire-hazardous destruction of products.

The results of the obtained calculations, the obtained new experimental data and the developed experimental and statistical models for determining the critical ranges of change in the burning rate of mixtures under conditions of elevated heating temperatures and external pressures for various values of the technological parameters of the data are planned to be used in the future to create an appropriate database for pyrotechnic products.

## REFERENCES

1. Palaszewski, B., & Zakany, J. S. (1995). Metallized gelled propellants: oxygen /RP-1/ aluminum rocket combustion experiments. AIAA Paper [in English].
2. Vashchenko, V., Kotelnikov, D., Lega, Yu., Krasnov, D., Yatsenko, I., & Kyrychenko O. (2006). *Teplovyye protsessy pri elektronnoy obrabotke opticheskikh materialov i ekspluatatsii izdeliy na ikh osnove* [Thermal processes in the electronic processing of optical materials and the operation of products based on them]. Kyiv: Naukova vidavnistvo: Naukova dumka [in Russian].
3. Vashchenko, V., Kyrychenko, O., Lega, Yu., Zaiika, P., Yatsenko, I., & Tsybulin V. (2008). *Protsessy gorennya metallizirovannykh kondensirovannykh sistem* [Combustion processes of metallized condensed systems], Kyiv: Naukova vidavnistvo: Naukova dumka [in Russian].
4. Yatsenko, I., Kyrychenko, O., Vashchenko, V., Dibrova, O., & Melnyk, V. (2019). Perspective development tendencies of electron beam technology in precision instruments industry, Sofia, Bulgaria: Scientific Technical Union of Mechanical Engineering Industry 4.0 [in English].
5. Yatsenko, I., Kyrychenko, O., Vashchenko, V., Sytnik, A., & Dibrova, O. (2019). Regularities of influence of electron-beam technology on technical and operational characteristics of optoelectronic devices., Sofia, Bulgaria: Scientific technical Union of Mechanical Engineering «Machines. Mechnologies. Materials» [in English].
6. Yatsenko, I., Kyrychenko, O., Vashchenko, V., Dibrova, O., & Melnyk, V. (2019). Perspective development tendencies of electron beam technology in precision instruments industry. Borovets, Bulgaria: IV International Scientific Conference high technologies. business. society [in English].
7. Dibrova, O., Kyrychenko, O., Motrychuk, R., Tomenko, M., & Melnyk V. (2020). Fire safety improvement of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under external thermal conditions. Kharkiv: Scientific Bulletin: technology audit and production reserves [in English].
8. Arkhipov, V., Korotkikh, A., & Kuznetsov V., (2010). Metals nanopowder influence on ignition of high-energy materials basis on ammonium nitrate. Ulsan, Korea: Abstracts book of the 5th International Forum on Strategic Technology (IFOST) [in English].
9. Arkhipov, V., & Korotkikh, A. (2012). The influence of aluminum powder dispersity on composite solid propellants ignitability by laser radiation. Pittsburgh: The official journal of the Combustion Institute «Combustion and Flame» [in English].
10. Yuma Ohkura, Pratap M. Rao, & Xiaolln Zheng (2011). Flash ignition of Al nanoparticles: mechanism and applications. Pittsburgh: The official journal of the Combustion Institute «Combustion and Flame» [in English].
11. Kovalyshyn, V., Marych, V., Novitskiy, Y., Gusar, B., Chemetskiy, V., & Mirus O. (2018). Improvement of a discharge nozzle damping attachment to suppress fires of class D. Kharkiv: Eastern-European Journal of Enterprise Technologies [in English].
12. Arkhipov, V., Korotkikh, A., & Kuznetsov V. (2007). Ignition of energetic materials containing nanopowder of metals . Self-propagating High-temperature Synthesis. Dijon, France: Book of Proceedings of the IX International Symposium [in English].

13. Arkhipov, V., Bondarchuk, S., & Korotkikh, A. (2009). Nonstationary burning rate of solid propellants. Moscow: Nonequilibrium Phenomena: Plasma, Combustion, Atmosphere [in English].
14. Arkhipov, V., Bondarchuk, S., & Korotkikh, A. (2010). Comparative analysis of methods for measuring the transient burning rate. I. Research methods. *Scientific Journal «Combustion, Explosion, and Shock Waves»* [in English].
15. Brewster, M. Q., & Mullen, J. C. (2010). Flame structure in aluminized wide-distribution AP composite propellants. Pittsburgh: The official journal of the Combustion Institute «Combustion and Flame» [in English].
16. Gnanaprakash, K., Han, B., & Yoh, J. J. (2020). Ignition and combustion behavior of zirconium-based pyrotechnic igniters and pyrotechnic delays under aging. Pittsburgh: Journal «Proceedings of Combustion Institute» [in English].
17. Gromov, A. A., Pautova, Yu. I., & Korotkikh, A. G. (2011). Interaction of powdery Al, Zr and Ti with atmospheric nitrogen and subsequent nitride formation under the metal powder combustion in air. Ohio: An International Journal on the Science and Technology of Wet and Dry Particulate Systems «Powder Technology» [in English].

## ПОПЕРЕДЖЕННЯ ПЕРЕДЧАСНОГО СПРАЦЬОВУВАННЯ ПІРОТЕХНІЧНИХ ВИРОБІВ НА ОСНОВІ СУМІШЕЙ З ПОРОШКІВ МАГНІЮ, АЛЮМІНІЮ ТА ОКСИДІВ МЕТАЛІВ В УМОВАХ ЗОВНІШНІХ ТЕРМІЧНИХ ДІЙ

Є. Кириченко, В. Гвоздь, О. Кириченко, О. Дядюшенко

Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, Україна

### КЛЮЧОВІ СЛОВА:

пожежна безпека,  
піротехнічні вироби,  
піротехнічні суміші,  
зовнішні термічні дії

### АННОТАЦІЯ

Для організації процесу горіння багатокомпонентних піротехнічних сумішей широко використовуються піротехнічні вироби на основі ущільнених двокомпонентних сумішей з порошоків алюмінієво-магнієвих сплавів та нітратовмісних окиснювачів (нітратів натрію, калію тощо). Уточнено математичні моделі зовнішнього нагріву зарядів піротехнічних виробів на основі сумішей з порошоків магнію, алюмінію та оксидів металів через урахування температурних залежностей їх теплофізичних властивостей, що дало змогу більш точно визначити критичні значення теплових потоків та тривалостей їх впливу. Отримано нові експериментальні дані та розроблено експериментальні статистичні моделі для визначення критичних діапазонів швидкостей горіння сумішей за підвищених температур нагрівання (до 800 K) і зовнішнього тиску (до  $10^7$  Па) для різних значень технологічних параметрів (коефіцієнт надлишку окислювача  $\alpha$ ; середній розмір частинок порошкового металевого палива  $d_m$  і окисника  $d_N$ ). Визначено, що перевищення критичних діапазонів технологічних параметрів призводить до нестійкого вибухонебезпечного розвитку їх горіння та пожежонебезпечного руйнування піротехнічних виробів на основі сумішей магнію, алюмінію та оксидів металів після передчасного займання сумішей в умовах зовнішніх термічних дій. На основі розроблених математичних та експериментально-статистичних моделей можна розробити науково-обґрунтований метод визначення критичних діапазонів зміни параметрів зовнішніх теплових дій на заряди піротехнічних виробів та швидкостей розвитку їх горіння в них. умови. На підґрунті цього методу можна розробити засоби контролю та технологічні рекомендації, що підвищують пожежну безпеку виготовлених піротехнічних виробів на основі сумішей оксидів магнію, алюмінію та металів. Результати розрахунків, нові експериментальні дані та розроблені експериментальні статистичні моделі для визначення критичних діапазонів швидкості горіння сумішей за підвищених температур і зовнішнього тиску для різних значень технологічних параметрів даних будуть використані для створення відповідної бази даних піротехнічних виробів.

УДК 614.841

## УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ВИПРОБУВАНЬ З ВИЗНАЧЕННЯ ВОГНЕЗАХИСНОЇ ЗДАТНОСТІ ВОГНЕЗАХИСНИХ ЗАСОБІВ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2.44-51>

Коваленко В. В.\*, ORCID iD 0000-0001-5780-5684  
Добростан О. В., ORCID iD 0000-0001-8908-0729  
Тимошенко О. М., ORCID iD 0000-0001-7568-5030  
Борисова А. С., ORCID iD 0000-0002-8700-0761  
\*E-mail: vitalii-kovalenko@ukr.net

*Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Україна*

### ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

*Надійшла до редакції: 15.10.2022*

*Пройшла рецензування: 09.11.2022*

### КЛЮЧОВІ СЛОВА:

засоби вогнезахисту, вогнезахисна ефективність, група горючості, випробування, метод

### АНОТАЦІЯ

Наведено результати аналізу вимог нормативно-правових актів та нормативних документів щодо необхідності оброблення засобами вогнезахисту елементів горищних покриттів, дерев'яних конструкцій, матеріалів, що застосовуються у внутрішньому обладнанні під час будування та ремонту вагонів, текстильних матеріалів для виготовлення завіс, штор, оббивки диванів тощо. Досліджено суть класифікаційного методу випробувань визначення вогнезахисної ефективності, методу визначення групи горючості речовин і матеріалів, а також розглянуто вимоги щодо випробувань вогнезахисних засобів, які використовують в країнах Європейського Союзу. Проведено порівняння методів із визначення вогнезахисної ефективності вогнегасних матеріалів та групи горючості речовин і матеріалів. Здійснено випробування шести зразків вогнезахисних засобів. Встановлено відмінність у критеріях оцінки вогнезахисного засобу та групи горючості речовин і матеріалів, а саме – температури димових газів, часу самостійного горіння та тривалості випробування. З огляду на проведені дослідження виникає потреба в удосконаленні методу визначення вогнегасної здатності з обґрунтуванням необхідності фіксування температури димових газів, часу самостійного горіння (тління) та часу проведення випробувань.

**Постановка проблеми.** Дерев'яні конструкції за своїми експлуатаційними та фізико-механічними властивостями є найбільш використовуваним будівельним матеріалом. Відомо, що деревина – горючий матеріал, який повністю знищується під час пожежі.

З метою зниження показників пожежонебезпечності деревини використовують вогнезахисні засоби (суміш, фарбу, штукатурку, штучний виріб або листовий (рулонний) матеріал), які за своїми властивостями придатні для вогнезахисту. Нині висувається різні вимоги до визначення ефективності вогнезахисних засобів та вогнезахисної деревини. Ефективність протипожежного

захисту об'єктів різного призначення підвищується із застосуванням вогнезахисної деревини, яка відповідає вимогам нормативних документів [1]. На сьогодні вимоги для вогнезахисних матеріалів і деревини вогнезахисної різняться та не відповідають нормам, які визначені у нормативних документах Європейського Союзу. Крім того, вони не відповідають методам випробувань речовин і матеріалів, які використовуються в однакових сферах застосування. З огляду на зазначене розпочато дослідження в напрямі визначення та порівняння наявних методів, узгодження їх з європейськими вимогами та удосконалення єдиного методу випробування.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Питання вогнезахисту досліджуються як українськими науковцями, так і вченими з інших країн. У роботі [2] наведено результати розроблення технології отримання і нанесення вогнезахисного покриття для деревини на основі епоксіамінних композицій.

Про ефективність застосування вогнезахисних покриттів на основі органічних речовин зазначено в роботах [3–4], однак питання перевірки вогнегасних засобів не досліджувалось.

У роботі [5] науковці присвятили увагу вивченню горючості деревини, просоченої антипіренами. Для визначення впливу обробки деревини антипіренами на вогнезахисні властивості деревини в роботі використовували методику визначення зольності та методику контролю якості вогнезахисної обробки. Дослідження довели, що вогнезахисну ефективність деревини у разі дворазового нанесення розчину забезпечує лише меламінполіфосфатне покриття.

Все це дає змогу стверджувати, що доцільним є проведення дослідження щодо аналізування, порівняння та удосконалення методу з визначення вогнезахисної ефективності вогнезахисних матеріалів.

**Формулювання цілей дослідження.** Метою роботи є порівняння методів з визначення вогнезахисної ефективності вогнезахисних матеріалів та визначення групи горючості деревини, обробленої вогнезахисним матеріалом.

Для досягнення цієї мети було поставлено завдання щодо аналізу європейських нормативних документів, нормативних документів, чинних на території України, а також встановлення відмінностей та проведення випробувань з їх визначення відповідно до різних методик.

**Методи дослідження.** Для дослідження застосовано аналітичний та експериментальний методи, які полягають в аналізуванні й вивченні положень вітчизняних стандартів, які описують метод визначення групи горючості речовин і матеріалів, та метод визначення

вогнезахисної ефективності вогнегасних матеріалів, а також використовувані в країнах Європейського Союзу вимоги щодо вогнезахисних засобів [6]. Зазначені вимоги [6] поширюються на фарби, засоби для нанесення покриттів, лаки та засоби для поверхневого просочування, які наносять у місці експлуатування з метою покращення однієї або більшої кількості характеристик пожежної небезпечності поверхні будівельного виробу. Вогнезахисний засіб (у комбінації з виробом / підкладкою, які оброблено ним) потрібно випробувати, користуючись методами випробування для відповідного класу за реакцією на вогонь згідно з [7], і класифікувати відповідно до [8] у взаємозв'язку з [7], який встановлює процедуру класифікації щодо реакції на вогонь всіх будівельних виробів, у тому числі тих, які є складниками будівельних конструкцій, крім силових, контрольних кабелів та кабелів зв'язку, на які поширюється [9].

У експериментальній частині застосовувались процедури щодо виготовлення зразків для випробування, нанесення на них вогнезахисних засобів, фіксування температури газоподібних продуктів горіння, максимального приросту температури, проміжку часу до досягнення максимальної температури, маси зразків та втрати маси зразків.

**Виклад основного матеріалу.** Відповідно до вимог [10] у будинках, крім будинків V ступеня вогнестійкості, дерев'яні елементи горищних покриттів слід обробляти засобами вогнезахисту, які забезпечують I групу вогнезахисної ефективності згідно з [11]. Відповідно до вимог [12] усі горючі декорації, сценічне оформлення, драпірування в залах для глядачів та експозиційних залах, фое мають бути важкозаймистими або обробленими вогнезахисними засобами. Дерев'яні конструкції сценічної коробки, дерев'яні конструкції будинків та навісів складів мають бути оброблені вогнезахисними засобами, що забезпечують I групу вогнезахисної ефективності.

Відповідно до [13] дерев'яні конструкції і деталі вагона, які заново встановлюються, мають бути оброблені вогнезахисною речовиною, стелажі та шафи для зберігання вантажів мають виконуватись із негорючих матеріалів і надійно закріплюватись. Зокрема, відповідно до правил зберігання вантажів допускається застосовувати просочені вогнезахисною речовиною конструкції.

Матеріали, що застосовуються у внутрішньому обладнанні під час будівництва і ремонту пасажирських вагонів залежно від їхнього призначення мають бути:

негорючі – для виготовлення стель, повітроводу вентиляційної установки, каркасів диванів, спальних полиць і крісел, підшивки ізоляції даху. Допускається виготовлення стель з важкогорючих матеріалів за умови застосування негорючого матеріалу для термоізоляції кузова вагона і підшивки ізоляції даху та встановлення пожежних оповіщувачів у кожному службовому та пасажирському приміщеннях вагона;

негорючі або важкогорючі – для термоізоляції кузова, виготовлення футлярів акумуляторних батарей, перегородок, багажних полиць, меблів, рундуків, обшивки стін і дверей, дерев'яних закладних деталей, обрешітки стін, стель і даху, конструкцій підлоги (обрешітка, термоізоляція, настил);

важкогорючі або горючі важкозаймисті – для гідроізоляції, дифузорів, компенсувальних вставок і звукоізолювальних елементів вентустановки, звукоізоляції стель, теплоізоляції труб і баків водопостачання, труб опалення, кондиціонера, корпусів акумуляторів. Для акумуляторів з металевим корпусом допускається використання ізоляційних гумових чохла.

Текстильні матеріали (у тому числі з покриттям і просоченням) для виготовлення завісів, штор, оббивки диванів, спальних полиць і крісел мають бути важкозаймистими згідно з [14].

За результатами аналізу вимог нормативних документів встановлено, що

до матеріалів, у тому числі деревини, обробленої вогнезахисними засобами, встановлено вимоги щодо групи вогнезахисної ефективності відповідно до [11] та групи горючості відповідно до [15].

Крім того, деякі вимоги до вогнезахисної деревини наведені в [16].

Група вогнезахисної ефективності визначається відповідно до [11]. Загальний вигляд установки наведено на рис. 1.

Суть класифікаційного методу випробувань полягає у визначенні втрати маси зразків деревини під час вогневих випробувань унаслідок впливу полум'я пальника із заданими параметрами (початкова температура газоподібних продуктів горіння на виході з керамічної труби становить  $(200 \pm 5)^\circ\text{C}$  на зразок вогнезахисної деревини протягом 2 хв, який розташовано в керамічній трубці установки УВГВЕ, за умов, що сприяють акумуляції тепла. Випробуванням піддаються 10 зразків деревини. Залежно від величини втрати маси зразків вогнезахисні засоби поділяють за ефективністю вогнезахисту на групи (див. табл. 1).

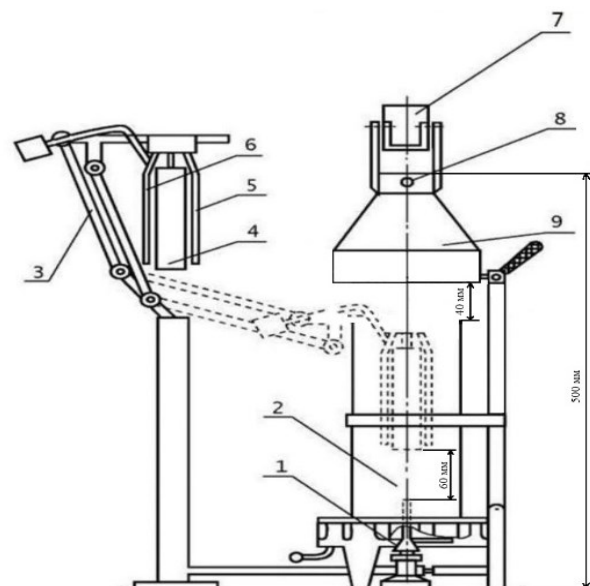


Рисунок 1 – Установка для визначення вогнезахисної ефективності покриттів та просочувальних речовин для деревини за [11], де:

1 – газовий пальник; 2 – керамічна реакційна камера; 3 – механізм введення зразка; 4 – зразок; 5, 6 – тримач зразка; 7 – дзеркало; 8 – термопара; 9 – зонт

Таблиця 1 – Групи вогнезахисної ефективності згідно з [11]

Втрата маси, %	Група вогнезахисної ефективності покриття або просочення, що випробується
Не більше 9	I
Більше 9, але не більше 25	II

Якщо втрата маси зразків після випробувань становить понад 25%, засіб не забезпечує вогнезахист деревини.

Відповідно до [16] вогнезахиснена деревина поділяється на групи:

I група – деревина, що належить до важкогорючих матеріалів;

II група – деревина, що належить до важкозаймистих матеріалів.

I група деревини має три підгрупи, а саме:

IA – важкогорюча деревина, під час випробувань за [11] втрата маси десяти зразків, після 120 с вогневого впливу, не більше 5%, максимальна температура димових газів не більше 220 °C та немає самостійного тління та горіння;

IB – важкогорюча деревина, під час випробувань за [11] втрата маси десяти зразків, після 120 с вогневого впливу, не більше 7%, максимальна температура димових газів не більше 250 °C та час самостійного тління та горіння не більше 60 с;

IV – важкогорюча деревина, під час випробувань за [11] втрата маси десяти зразків після 120 с вогневого впливу не більше 9%, максимальна температура димових газів не більше 350 °C і час самостійного тління та горіння не більше 60 с.

II група – важкозаймиста деревина, під час випробувань за [16] середня втрата маси десяти зразків не більше 25%.

Група горючості речовин і матеріалів визначається відповідно до [15].

Суть методу експериментального визначення групи важкогорючих і

горючих твердих речовин і матеріалів полягає у впливі на зразок, який розташований у керамічній трубі установки ОТМ, полум'я пальника із заданими параметрами (температура газоподібних продуктів горіння на виході з керамічної труби становить  $(200 \pm 5)$  °C). Під час проведення випробування фіксують максимальний приріст температури газоподібних продуктів горіння ( $\Delta t_{\max}$ ) та втрату маси зразка ( $\Delta m$ ). Якщо під час випробувань  $\Delta t_{\max}$  не перевищує 60 °C, то тривалість випробувань має становити  $(300 \pm 2)$  с. Якщо  $\Delta t_{\max}$  перевищує 60 °C, то тривалість випробувань визначають як проміжок часу ( $\tau$ ) до досягнення максимальної температури. За результатами випробувань матеріали класифікують як:

- важкогорючі –  $\Delta t_{\max} < 60$  °C та  $\Delta m < 60$  %;

- горючі –  $\Delta t_{\max} \geq 60$  °C або (та)  $\Delta m \geq 60$  %.

Горючі матеріали залежно від значення ( $\tau$ ) досягнення  $\Delta t_{\max}$  поділяють на:

- важкозаймисті –  $\tau > 240$  с;

- середньої займистості –  $30 \text{ с} \leq \tau \leq 240$  с;

- легкозаймисті –  $\tau < 30$  с.

Дослідженням піддавалися шість вогнезахисних засобів, які нанесено на деревину згідно з вимогами відповідних нормативних документів. Для проведення випробувань використовували по три зразки кожного вогнезахисного матеріалу. Слід зазначити, що всі вогнезахисні засоби відповідають I групі вогнезахисної ефективності, тобто середнє значення втрати маси зразків не перевищувало 9%. Температура димових газів не вимірювалась.

Результати проведення досліджень шести зразків вогнезахисних засобів наведено у таблиці 2.

Таблиця 2 – Результати досліджень з визначення групи горючості за [15] зразків деревини, обробленої вогнезахисними засобами

№ зразка	Температура газоподібних продуктів горіння, °С		Максимальний приріст температури газоподібних продуктів горіння $\Delta t$ , °С	Проміжок часу до досягнення максимальної температури $\tau$ , с	Маса зразка, г		Втрати маси зразка $\Delta m$ , %
	початкова $t_0$	максимальна $t_{max}$			до випробування	після випробування	
<b>Зразок № 1</b>							
1	200	328	128	179	131,9	120,5	8,6
2	199	312	113	190	132,5	119,4	9,9
3	197	321	124	174	131,8	120,7	8,4
<b>Зразок № 2</b>							
1	200	339	139	188	134,9	120,5	10,7
2	202	357	155	171	133,5	118,3	11,4
3	197	324	127	169	133,1	120,7	9,3
<b>Зразок № 3</b>							
1	199	227	28	300	149,1	134,8	9,6
2	201	222	21	300	150,6	140,1	7,0
3	199	254	55	300	149,0	135,0	9,4
<b>Зразок № 4</b>							
1	202	256	54	300	152,5	135,1	11,4
2	201	253	52	300	153,8	136,7	11,1
3	203	251	48	300	154,3	138,6	10,2
<b>Зразок № 5</b>							
1	198	255	57	300	153,9	139,1	9,6
2	202	257	55	300	154,5	139,3	9,8
3	200	253	53	300	153,7	140,0	8,9
<b>Зразок № 6</b>							
1	200	212	12	300	145,7	134,5	7,7
2	202	242	40	300	149,4	137,1	8,2
3	198	219	21	300	151,1	139,3	7,8

Джерело: розроблено авторами

Із аналізу отриманих експериментальних даних випливає, що досліджувані зразки, які відповідають І групі вогнезахисної ефективності за [11], належать до різних груп відповідно до [15], а саме: зразки № 1 та № 2 – горючі, середньої займистості; зразки № 3–6 – важкогорючі, хоча вимоги до сфери застосування вогнезахисного засобу за [11] та матеріалу за [15] збігаються.

Відповідно до [16] додатковим критерієм оцінки є температура димових газів та час самостійного горіння (тління), що не зазначено в [11]. Крім того, під час аналізу [16] не можна класифікувати деревину вогнезахиснену з температурою димових газів понад 350 °С, часом

самостійного горіння або тління не більше 60 с та втратою маси до 9%.

**Висновки та напрями подальших досліджень.** За результатами аналізу європейських нормативних документів встановлено, що вогнезахисні засоби класифікуються за [7] щодо реакції на вогонь, як і всі інші будівельні матеріали.

Також доведено, що в нормативних документах, чинних в Україні, встановлено вимоги лише до І групи вогнезахисної ефективності вогнезахисних засобів. Вимог щодо класифікації ІІ групи вогнезахисної ефективності, які встановлені в [11] та [16], групи ІА, ІБ та

ІВ в нормативних документах, чинних в Україні, немає.

Під час проведення випробувань [11] не потребує контролю температури димових газів та фіксації самостійного горіння зразків після вилучення джерела запалювання, на відміну від [16] та [15].

Крім того, встановлено, що під час випробувань зразків № 1 та № 2 зафіксовано максимальну температуру димових газів у діапазоні від 312 °С до 328 °С – для зразка № 1 та 324–339 °С – для зразка № 2, причому час досягнення лежить у межах від 174 с до 190 с – для

зразка № 1 та від 169 с до 188 с – для зразка № 2, що перевищує загальне значення проведення випробувань за [11], котре дорівнює 120 с.

З огляду на зазначене актуальним питанням є удосконалення методу визначення вогнезахисної здатності з обґрунтуванням необхідності фіксування температури димових газів, часу самостійного горіння (тління), часу проведення випробувань, класифікації II групи вогнезахисної ефективності за [11], [16] та визначення сфери його застосування.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Tsapko Y. V., Pinchevska O. O., Tsapko O. Y. Встановлення умов застосування вогнезахисної деревини на об'єктах різного призначення. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2019. № 29(2). С. 99–102. doi.org/10.15421/40290220.
2. Пархоменко В., Борисяк П., Лавренюк О., Михалічко Б. Технологія вогнезахисту деревини покриттями на основі модифікованих епоксіамінних композицій. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2022. № 1(13). С. 80–87. doi.org/10.33269/nvcz.2022.1(13).80–87.
3. Fan F.-Q., Xia Z.-B., Li Q.-Y., & Li Z. Effects of inorganic fillers on the shear viscosity and fire retardant performance of waterborne intumescent coatings. *Progress in Organic Coatings*. 2013. № 76(5). P. 844–851.
4. Lowden L. A., Hull T. R. Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction. *Fire Sci. Rev.* 2. P. 1–19.
5. Verner N., Alekseev K., Nazarenko K., Amelkovich Y. Study of Fire-Retardance Effectiveness of Wood Treated with Fire Retardants. *Studies in Systems, Decision and Control*. 2023. 433 p. P. 177–186.
6. Fire retardant products : EAD 350865-00-1106. URL : [https://www.eota.eu/download ?file=/2017/17-35-0865/ead%20for%20ojeu/ead%20350865-00-1106\\_ojeu2020.pdf](https://www.eota.eu/download ?file=/2017/17-35-0865/ead%20for%20ojeu/ead%20350865-00-1106_ojeu2020.pdf). (last accessed : 20.10.2022).
7. Пожежна класифікація будівельних виробів і будівельних конструкцій. Частина 1. Класифікація за результатами випробувань щодо реакції на вогонь (EN 13501-1:2007+A1:2009, IDT) : ДСТУ EN 13501-1:2016 [Чинний з 01.09.2016]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 53 с.
8. Regulation (EU) № 305/2011 of the European Parliament and of the Council of 9 March 2011 laying down harmonized conditions for the marketing of construction products and repealing Council Directive 89/106/EEC (Регламент (ЄС) № 305/2011 Європейського Парламенту та Ради від 9 берез. 2011 р., що встановлює гармонізовані умови для розміщення на ринку будівельних виробів та скасовує Директиву Ради 89/106/ЄЕС). OJ L 88, 4.4.2011. P. 5–43.
9. Пожежна класифікація будівельних виробів і будівельних конструкцій. Ч. 6. Класифікація за результатами випробування щодо реакції на вогонь кабелів силових, контрольних та зв'язку (EN 13501-6:2018, IDT) : ДСТУ EN 13501-6:2019 [Чинний з 01.01.2020]. Київ : УкрНДНЦ, 2019. 30 с.
10. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги : ДБН В.1.1-7:2016 [Чинний з 01.06.2017]. Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2017. 35 с.
11. Средства огнезащитные для древесины. Методы определения огнезащитных свойств : ГОСТ 16363-98 [Действующий с 01.09.2000]. Минск : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1998. 7с.
12. Правила пожежної безпеки в Україні : НАПБ А.01.001-2014 [Чинний з 22.01.2021]. Затв. наказом МВС України від 25.11.2020. № 830, 2020. 85 с.
13. Правила пожежної безпеки на залізничному транспорті : НАПБ В.01.010-2009/510 [Чинний з 01.08.2010]. Затв. наказом Міністерства транспорту та зв'язку України від 21.12.2009 № 1322. 2009. 78 с.
14. Захист від пожеж. Матеріали текстильні. Метод випробування на займистість (IMO-Res. A. 471 (XII), NEQ) : ДСТУ 4155-2003 [Чинний з 01.01.2004]. Київ : Держспоживстандарт України, 2003. 7 с.
15. Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація : ДСТУ 8829:2019 [Чинний з 01.01.2020]. Київ : УкрНДНЦ, 2020. 75 с.
16. Древесина огнезащитная. Общие технические требования. Методы испытаний. Транспортирование и хранение : ГОСТ 30219-95 [Действующий с 01.01.1998]. Минск : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1995. 17 с.

### REFERENCES

1. Tsapko, Y. V., Pinchevska, O. O., Tsapko, O. Y. (2019). Vstanovlennia umov zastosuvannia vohnezakhyshchenoi derevyny na ob'iektakh rizno-ho pryznachennia [Establishing conditions for the use of fire-resistant wood at objects of various purposes]. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy*, 29 (2), 99–102. doi.org/10.15421/40290 [in Ukrainian].
2. Parkhomenko, V., Borysiak, P., Lavreniuk, O., Mykhalichko, B. (2022). Tekhnolohiia vohnezakhy-stu derevyny pokryttiamy na osnovi modyfikovanykh epoksiaminnykh kompozy-tsii [Technology of fire protection of wood with coatings based on modified epoxy-siamin compositions]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhehzna bezpeka*, 1 (13), 80–87. doi.org/10.33269/nvcz.2022.1(13).80–87 [in Ukrainian].



3. Fan, F.-Q., Xia, Z.-B., Li, Q.-Y., & Li, Z. (2013). Effects of inorganic fillers on the shear viscosity and fire retardant performance of waterborne intumescent coatings. *Progress in Organic Coatings*, 76(5), 844–851. [in Ukrainian].
4. Lowden, L. A., Hull, T. R. (2013). Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction. *Fire Sci*, 2, 1–19. [in Ukrainian].
5. Verner, N., Alekseev, K., Nazarenko, O., Amelkovich, Y. Study of Fire-Retardance Effectiveness of Wood Treated with Fire Retardants (2023) *Studies in Systems, Decision and Control*, 433, 177-186. [in Ukrainian].
6. Fire retardant products: EAD 350865-00-1106. Retrieved from [https://www.eota.eu/download?file=/2017/17-35-0865/ead%20for%20ojeu/ead%20350865-00-1106\\_ojeu2020.pdf](https://www.eota.eu/download?file=/2017/17-35-0865/ead%20for%20ojeu/ead%20350865-00-1106_ojeu2020.pdf). [in Ukrainian].
7. Pozhezhna klasyfikatsiia budivelnykh vyrobiv i budivelnykh konstrukttsii. Chastyna 1. Klasyfikatsiia za rezultatamy vyprobuvan shchodo reaktsii na vohon (EN 13501-1:2007+A1:2009, IDT) [Fire classification of construction products and construction structures. Part 1. Classification according to the results of tests for reaction to fire (EN 13501-1:2007+A1:2009, IDT)]. (2016). DSTU EN 13501-1:2016 from 1st September 2016. Kyiv: DP «UkrNDNTs» [in Ukrainian].
8. Regulation (EU) № 305/2011 of the European Parliament and of the Council of 9 March 2011 laying down harmonized conditions for the marketing of construction products and repealing Council Directive 89/106/EEC (Rehlement (ES) № 305/2011 Yevropeiskoho Parlamentu ta Rady vid 9 bereznia 2011 roku shcho vstanovliuie harmonizovani umovy dlia rozmishchennia na rynku budivelnykh vyrobiv ta skasovuie Dyrektyvu Rady 89/106/EEC). – OJ L 88, 4.4.2011 [in English].
9. Pozhezhna klasyfikatsiia budivelnykh vyrobiv i budivelnykh konstrukttsii. Chastyna 6. Klasyfikatsiia za rezultatamy vyprobuvannia shchodo reaktsii na vohon kabeliv sylo-vykh, kontrolnykh ta zviazku (EN 13501-6:2018, IDT) [Regulation (EU) Fire classification of construction products and construction structures. Part 6. Classification according to the results of the fire reaction test of power, control and communication cables (EN 13501-6:2018, IDT)]. (2019). DSTU EN 13501-6:2019 from 1st January 2020. Kyiv: DP «UkrNDNTs» [in Ukrainian].
10. Pozhezhna bezpeka ob'ektiv budivnytstva. Zahalni vymohy [Fire safety of construction sites. general requirements]. (2017). DBN V.1.1-7:2016 from 1st June 2017. Kyiv: DP «UkrNDNTs» [in Ukrainian].
11. Sredstva ogneshchitnye dlya drevesini. Metodi opredeleniya ogneshchitnykh svoystv [Fire retardants for wood. Methods of determining flame retardant properties]. (1998). HOST 16363-98 from 1st September 2000. Mynsk: Mezhhosudarstvennyi sovet po standartyzatsyy, metrolohy y sertyfykatsyy [in Russian].
12. Pravyla pozhnoi bezpeky v Ukraini [Fire safety rules in Ukraine]. (2020). NAPB A. 01.001-2014 from 22 January 2021. zatv. Order of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine from 25 November 2020, № 830. [in Ukrainian].
13. Pravyla pozhzhnoi bezpeky na zaliznychnomu transporti [Rules of fire safety in railway transport]. (2009). NAPB V. 01.010-2009/510 from 1st August 2010. zatv. Order of the Ministry of Transport and Communications of Ukraine from 21 December 2009, № 1322. [in Ukrainian].
14. Zakhyst vid pozhhezh. Materialy tekstylni. Metod vyprobuvuvannia na zaimystist (IMO-Res. A. 471 (XII), NEQ) [Fire protection. Textile materials. Flammability test method (IMO-Res. A. 471 (XII), NEQ)]. (2003). DSTU 4155-2003 from 1st January 2004. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy [in Ukrainian].
15. Pozhezhovybukhonebezpechnist rehovyn i materialiv. Nomenklatura pokaznykiv i metody yikhnoho vyznachennia. Klasyfikatsiia [Fire and explosion hazard of substances and materials. Nomenclature of indicators and methods of their determination. Classification]. (2020). DSTU 8829:2019 from 1st January 2020. Kyiv: DP «UkrNDNTs» [in Ukrainian].
16. Drevesina ogneshchishchennaya. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya. Metodi ispitaniy. Transportirovanie i khranenie [The wood is fire retardant. General technical requirements. Test methods. Transportation and storage]. (1995). HOST 30219-95 from 1st January 1998. Mynsk: Mezhhosudarstvennyi sovet po standartyzatsyy, metrolohy y sertyfykatsyy [in Russian].

## IMPROVEMENT OF THE TEST METHOD FOR DETERMINING THE FIRE PROTECTION CAPACITY OF FIRE PROTECTION EQUIPMENT

*V. Kovalenko, O. Dobrostan, O. Tymoshenko, A. Borysova*  
*Institute of Public Administration and Research on Civil Protection, Ukraine*

---

### KEYWORDS

means of fire protection, fire protection efficiency, flammability group, trial, method

### ANNOTATION

An analysis of the regulatory and legal provision of fire safety regarding the need to treat elements of attic coverings, wooden structures, materials used in interior equipment during the construction and repair of carriages, textile materials for the manufacture of curtains, curtains, upholstery of sofas, etc. with fire protection means is provided. The essence of the classification method of tests, the method of determining the flammability group of substances and materials was studied, and the requirements for fire retardants used in the countries of the European Union were analyzed. A comparison of methods for determining the fire-retardant efficiency of fire-extinguishing materials and determining the flammability group of wood treated with fire-retardant material was carried out. According to the analyzed methods, six fire retardants were tested by applying them to the examined wooden material, three samples of each fire retardant material. Based on the results of the tests and evaluation of the research data, it was established that the tested samples that correspond to certain groups of flammability and one regulatory document belong to different groups of other requirements of regulatory documents. It was also established that there is no additional criterion for evaluating a fire retardant, namely: the temperature of smoke curtains and the time of self-burning, which creates a problem for the classification of fire retardant wood. The conducted studies indicate the need to improve the method of determining the fire-extinguishing capacity with the justification of the need to fix the temperature of flue gases, the time of self-burning (smoldering), the time of conducting tests and the need to classify the II group of fire protection efficiency according to the analyzed standards.

---

УДК 614.841.34

## РЕЗУЛЬТАТИ ЛАБОРАТОРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕКРАНУВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ВОДЯНИХ ЗАВІС ВІД ПРОНИКНЕННЯ НЕБЕЗПЕЧНИХ ФАКТОРІВ ПОЖЕЖІ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2.52-64>

Бенедюк В. С. \*, ORCID iD 0000-0002-5109-5295

Стилик І. Г., ORCID iD 0000-0002-8474-2014

Тимошенко О. М., ORCID iD 0000-0001-7568-5030

Ліхнівський Р. В., ORCID iD 0000-0002-9187-9780

Онищук А. Є., ORCID iD 0000-0002-1829-126X

Присяжнюк В. В., ORCID iD 0000-0002-9780-785X

\*E-mail: naanotek@ukr.net

*Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Україна*

### ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

*Надійшла до редакції: 15.10.2022*

*Пройшла рецензування: 09.11.2022*

### КЛЮЧОВІ СЛОВА:

пожежа, протипожежний захист, водяна завіса, щільність теплового радіаційного потоку, оптична щільність диму, концентрація небезпечних факторів пожежі, екранувальна здатність, технічні пристрої для створення водяних завіс

### АНОТАЦІЯ

Наведено результати аналізу вимог нормативно-правових актів та нормативних документів щодо необхідності оброблення засобами вогнезахисту елементів горищних покриттів, дерев'яних конструкцій, матеріалів, що застосовуються у внутрішньому обладнанні під час будування та ремонту вагонів, текстильних матеріалів для виготовлення завіс, штор, оббивки диванів тощо. Досліджено суть класифікаційного методу випробувань визначення вогнезахисної ефективності, методу визначення групи горючості речовин і матеріалів, а також розглянуто вимоги щодо випробувань вогнезахисних засобів, які використовують у країнах Європейського Союзу. Проведено порівняння методів із визначення вогнезахисної ефективності вогнегасних матеріалів та групи горючості речовин і матеріалів. Здійснено випробування шести зразків вогнезахисних засобів. Встановлено відмінність у критеріях оцінки вогнезахисного засобу та групи горючості речовин і матеріалів, а саме – температури димових газів, часу самостійного горіння та тривалості випробування. З огляду на проведені дослідження виникає потреба в удосконаленні методу визначення вогнегасної здатності з обґрунтуванням необхідності фіксування температури димових газів, часу самостійного горіння (тління) та часу проведення випробувань.

**Постановка проблеми.** Автори у [1] розглянули висвітлені у чинній в Україні нормативній документації та інших джерелах доступної інформації питання щодо запобігання (зменшення) дії небезпечних факторів пожежі на людей, промислове обладнання, майно та конструкції будівель і споруд, зокрема через застосування водяних завіс. Наведено результати аналізу щодо ефективності водяних завіс з екранування від негативних впливів теплового випромінювання, проникнення диму, а також небезпечних газів як під час

пожеж, так і локалізації й ліквідації інших, газонебезпечних, ситуацій та аварій. Окреслено актуальність та напрями, за якими планувалось проведення теоретичних та експериментальних досліджень з наведеного питання.

У цій статті, що є продовженням [1], наведено матеріали щодо отриманих результатів під час проведення лабораторних експериментальних досліджень водяних завіс щодо екранування від проникнення теплового випромінювання, диму та небезпечних газоподібних продуктів горіння, що

утворюються у разі виникнення пожеж. Зазначене буде використано під час підготовки і проведення натурних досліджень водяних завіс та розроблення рекомендацій щодо їх застосування у системах протипожежного захисту.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій з досліджуваного питання.** У статті [2] автор з багаторічним досвідом досліджень у галузі водяних завіс розглянув процес формування на поверхні вертикальної протипожежної штори, що зростається струменем розпиленої води, рухомої водяної плівки. Виконано теоретичний аналіз руху водяної плівки під дією сили тяжіння, наведено методику розрахунку її середньої товщини та швидкості руху залежно від інтенсивності зрошування. Теоретично розглянуто процес нагрівання водяної плівки тепловим випромінюванням інфрачервоного діапазону, характерного для типових осередків пожеж. Визначено ефективний сумарний коефіцієнт пропускання розпиленим струменем і водяною плівкою променистого теплового потоку та його залежність від основних фізичних і технічних параметрів. Зазначено, що теплове випромінювання є одним із найбільш небезпечних чинників, які супроводжують будь-яку пожежу. Воно загрожує здоров'ю та життю людей, обмежує зону активних дій рятувальних підрозділів. Розглянуто новітню схему колективного захисту від дії теплового випромінювання, в якій використано високоефективну екранувальну здатність суцільної водяної плівки. Вказано, що вода має сильну спектральну залежність показника поглинання, яка робить воду прозорою у видимому діапазоні (довжини хвиль 0,4–0,8 мкм) і непрозорою в інфрачервоному діапазоні, характерному для випромінювання під час пожеж (довжини хвиль 2–15 мкм). Завдяки цьому навіть тонка водяна плівка (товщиною менше 1 мм) може бути ефективним захисним екраном і непроникною перешкодою для теплового випромінювання.

У роботі [3] зазначено, що вимоги щодо застосування водяних завіс для протипожежного захисту об'єктів увійшли в зарубіжну практику, наведено приклад використання водяної завіси із дренчерними зрошувачами для протипожежного захисту промислового об'єкта довжиною понад 71 м та висотою понад 23 м.

У джерелі [4] наводиться аналіз гідравлічного розрахунку розподільного трубопроводу водяної завіси. Запропоновано удосконалення відомої із курсу гідравліки методики розрахунку трубопроводу з так званою попутною витратою рідини.

У статті [5] наведено результати досліджень впливу водяних струменів віялового типу на тепловий захист, зокрема пожежника-рятувальника під час пожежі. Стверджується, що мізерно малі збурювання на поверхні струменя під час виходу із насадки створюють поперечні коливання, що під дією сил поверхневого натягу і в'язкості рідини збільшуються та призводять до трансформації (розпадань) водяних струменів у повітрі. Разом із цим вказано, що для остаточного підтвердження теоретичних припущень щодо залежності одночасної дії сил поверхневого натягу і в'язкості води на стійкість струменя на межі «вода – повітря» необхідно провести додаткові експерименти.

У розділі Рекомендацій [6] Міжнародної Ради з великих електричних систем (CIGRE), присвяченому системам протипожежного захисту трансформаторних підстанцій, розміщених як у спорудах, так і на відкритому просторі, наведено, що водяні завіси розбризкують великі об'єми води вузьким потоком між сусідніми об'єктами, відсікаючи (екрануючи) їх від дії теплового випромінювання з боку палаючого об'єкта.

Автори статті [7] проаналізували особливості використання водяних завіс для захисту від теплового випромінювання пожежі об'єктів нафтогазового комплексу. Описується структура інтегрованої

діалогової системи, що містить електронну таблицю Microsoft Office Excel та сімейство макросів на Visual Basic for Applications. Це дає змогу на основі розгалуженого алгоритму розрахунку теплового режиму відкритої пожежі на об'єкті нафтогазового комплексу вичислити товщину водяної завіси і необхідну витрату води.

У [8] наведено ефективність застосування водяних завіс на нафтогазовому терміналі, у транспортному тунелі та на інших відкритих просторах, а також новий метод обчислення діаметра краплі водяної завіси, розрахунок коефіцієнта пропускання водяної завіси.

Також у [9] йдеться про використання тонкорозпиленої водяної завіси для запобігання поширенню диму, чадного газу, температури. Відповідно до результатів водяна завіса може бути ефективною у запобіганні від небезпечних факторів пожежі на ранніх її стадіях. Крім того, досліджено вплив форсунок з різними технічними характеристиками розпилення.

Таким чином, з огляду на аналіз зазначеного питання можна стверджувати, що на сьогодні роботи стосовно досліджень водяних завіс для застосування в системах протипожежного захисту тривають як в Україні, так і за кордоном, а зміст досліджень підтверджує їхню актуальність.

#### Формулювання цілей досліджень.

За мету ставилось висвітлення отриманих результатів лабораторних експериментальних досліджень щодо ефективності екранування водяних завіс від проникнення теплового радіаційного потоку, диму і двох небезпечних та найбільш поширених газів, що утворюються під час пожеж, – легшого за повітря, малорозчинного у воді, оксиду вуглецю (II) (далі – CO) та важчого за повітря, добре розчинного у воді, оксиду вуглецю (IV) (далі – CO<sub>2</sub>). Для досягнення цієї мети було поставлено такі завдання:

- визначення ефективності екранування водяних завіс від проникнення теплового радіаційного потоку за різних

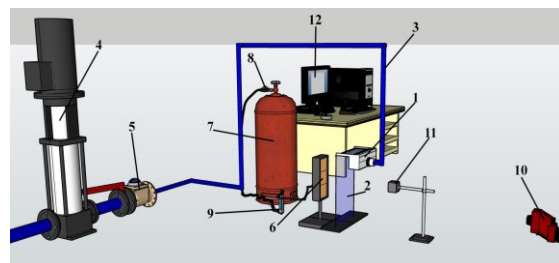
технологічних параметрів (витрата води, товщина водяного суцільно спадаючого потоку тощо);

- визначення ефективності екранування водяних завіс від проникнення диму за різних технологічних параметрів (витрата води, товщина водяного суцільно спадаючого потоку тощо);

- визначення ефективності екранування водяних завіс від проникнення CO та CO<sub>2</sub> за різних технологічних параметрів (витрата води, товщина водяного суцільно спадаючого потоку тощо).

**Методи дослідження.** В роботі було використано аналітичний та емпіричний методи дослідження ефективності екранування водяних завіс, що дало можливість досягти визначеної у статті мети.

**Виклад основного матеріалу.** Експериментальні дослідження з визначення показника екранування від проникнення теплового радіаційного потоку крізь суцільну водяну завісу виконувались на лабораторному стенді, принципова 3D-схема та загальний вигляд якого наведені на рис. 1.



а)



б)

*Рисунок 1* – Принципова 3D-схема (а); загальний вигляд лабораторного стенда для проведення експериментальних досліджень з визначення показника екранування від проникнення теплового радіаційного потоку крізь суцільну водяну завісу (б)

*Джерело:* розробка авторів

Лабораторний стенд для проведення експериментальних досліджень з визначення показника екранування від проникнення теплового радіаційного потоку крізь суцільну водяну завісу (далі – лабораторний стенд) складається з: водозливу 1, що формує суцільну водяну завісу 2, яка вільно спадає згори донизу під дією сили земного тяжіння (далі – завіса).

Схематичний устрій водозливу як поперечний розріз згідно з [10], який було взято за основу під час створення лабораторного стенда, наведено на рис. 2.

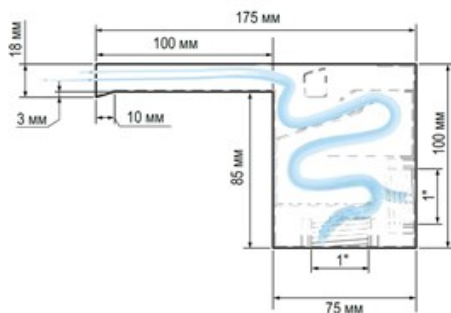


Рисунок 2 – Схематичний устрій водозливу  
Джерело: розробка авторів

Водозлив 1 має живильний трубопровід 3. Необхідна (розрахункова теоретична) товщина суцільної завіси (далі – товщина завіси), що визначається витратою води з водозливу, забезпечується регулюванням продуктивності водяного насоса 4, яка вимірюється витратоміром води 5.

Таблиця 1 – Засоби вимірювальної техніки, що використовуються під час проведення досліджень

Найменування ЗВТ	Діапазон вимірювань
Лінійка металева	від 0 мм до 1000 мм
Тепловізор TESTO 885-2	від 350°C до 1200°C
Датчик щільності теплового потоку	від 0,001 до 50,000 кВт/м <sup>2</sup>
Секундомір СОСпр2а-2-000	від 0 до 3600 с
Витратомір води	від 0,1 м <sup>3</sup> /год до 40 м <sup>3</sup> /год
Барометр-анероїд М67	від 600 мм рт. ст. до 800 мм рт. ст.
Психрометр МВ-4М	від мінус 10 °С до 50 °С; від 10 % до 100 %

Під час проведення лабораторних експериментальних досліджень застосовується метод прямого вимірювання величини щільності

Тепловий радіаційний потік створюється за допомогою радіаційної газової панелі 6, яка розміщена перед завісою 2. Радіаційна газова панель 6 під'єднана до балона 7 зі скрапленою пропан-бутановою сумішшю. Тиск газоподібної суміші, що подається до радіаційної газової панелі 6 регулюється та вимірюється за допомогою газового редуктора 8, а витрата газу регулюється та вимірюється за допомогою ротаметра 9. Температура сотової керамічної пластини радіаційної газової панелі 6, що нагрівається під час горіння пропан-бутанової суміші, вимірюється дистанційно за допомогою тепловізора 10. Величина щільності теплового радіаційного потоку, що випромінюється сотовою керамічною пластинкою, вимірюється за допомогою датчика щільності теплового потоку 11, який розміщений напроти радіаційної газової панелі 6 з іншого боку, за завісою 2.

Основні робочі параметри лабораторного стенда (величина щільності теплового радіаційного потоку, витрата води зі зливного пристрою, температура сотової керамічної пластини) фіксуються на персональному комп'ютері 12.

Засоби вимірювальної техніки, що використовуються під час проведення досліджень, наведені в табл. 1.

теплового потоку, що проник крізь завісу, за різних значень її товщини та величини щільності теплового потоку без застосування завіси.

Показник екранування від проникнення теплового потоку крізь завісу  $H_{m.n.}$  (%) визначається за формулою:

$$H_{m.n.} = \frac{I_1 - I_2}{I_1} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де:  $I_1$  – виміряна щільність теплового потоку без застосування завіси, кВт/м<sup>2</sup>;

$I_2$  – виміряна щільність теплового потоку із застосуванням завіси, кВт/м<sup>2</sup>.

Товщина завіси визначається за формулою:

$$B = \frac{Q \cdot 10^3}{L \cdot \sqrt{2gH}}, \text{ мм} \quad (2)$$

де:  $Q$  – продуктивність водяного насоса (витрата води з водозливу), м<sup>3</sup>/с;

$g$  – прискорення вільного падіння,  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ ;

$H$  – відстань від низу водозливу по висоті завіси до точки визначення її товщини, м;

$L$  – ширина завіси у точці визначення її товщини, м.

Послідовність проведення експериментальних досліджень була

такою. Радіаційну газову панель 6 та датчик щільності теплового потоку 11 розміщували на мінімально безпечних відстанях щодо завіси 2, не допускаючи потрапляння на них крапель води. Вмикали радіаційну газову панель 6 та розігрівали її сотову керамічну пластину до температури  $(1000 \pm 50) \text{ }^\circ\text{C}$  і після стабілізації температури (за показами тепловізора 10) датчиком щільності теплового потоку 11 фіксували величину щільності теплового потоку, без застосування завіси 2.

Аналогічно фіксували величину щільності теплового потоку із завісою 2, для різних витрат води з водозливу (для різних товщин завіси), не змінюючи інших попередніх робочих параметрів лабораторного стенда.

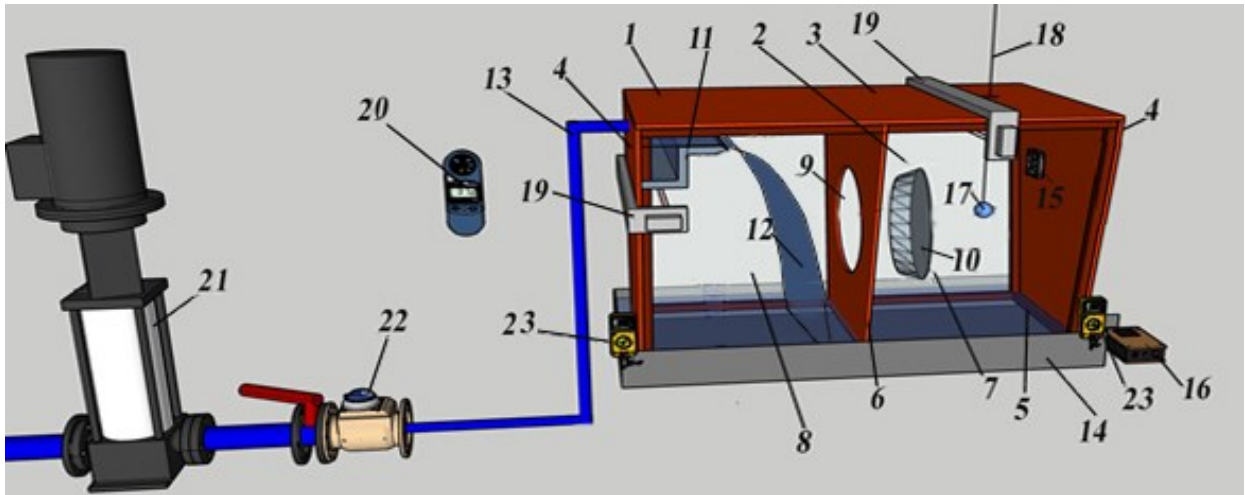
Зведені результати лабораторних експериментальних досліджень наведено в табл. 2, де вказано середньоарифметичні значення виміряних та розрахованих показників із трьох дослідів щодо кожного експерименту..

Таблиця 2 – Зведені результати лабораторних експериментальних досліджень з визначення показника екранування від проникнення теплового потоку крізь завісу

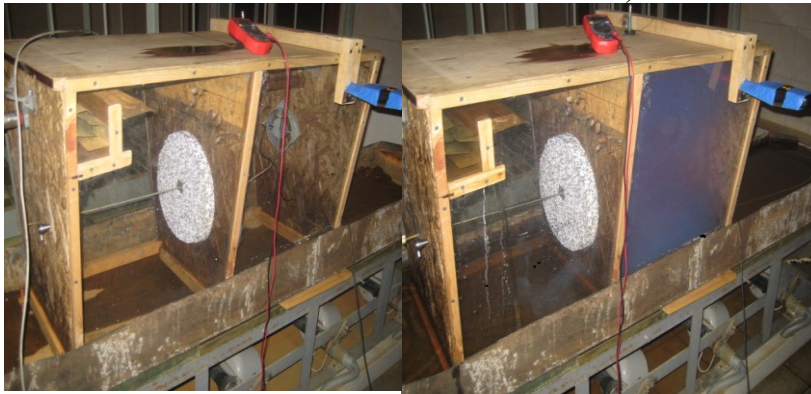
№ експерименту	$Q$ , м <sup>3</sup> /год	$H$ , м	$B$ , мм	$I_1$ , кВт/м <sup>2</sup>	$I_2$ , кВт/м <sup>2</sup>	$H_{m.n.}$ , %
1	1,50	0,55	0,22	2,640	0,333	87,4
2	1,98	0,55	0,28	2,640	0,257	90,3
3	2,51	0,55	0,36	2,640	0,174	93,4
4	2,96	0,55	0,42	2,640	0,116	95,6
5	1,58	0,55	0,23	4,200	0,462	89,0
6	2,10	0,55	0,30	4,200	0,348	91,7
7	3,13	0,55	0,45	4,200	0,233	94,5
8	3,98	0,55	0,57	4,200	0,181	95,7

Експериментальні дослідження з визначення показника екранування від проникнення диму крізь завісу виконувались на лабораторному стенді,

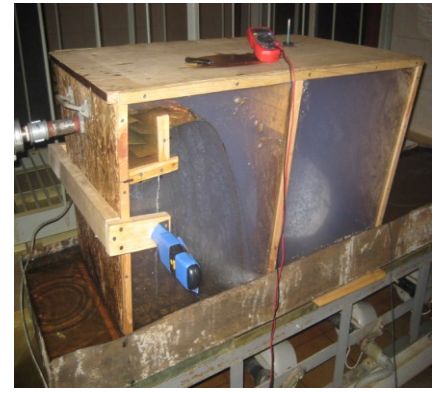
принципова 3D-схема, загальний вигляд якого та окремі робочі моменти під час проведення досліджень наведені на рис. 3.



а)



б)



в)

г)

Рисунок 3 – Принципова 3D-схема (а); загальний вигляд лабораторного стенда для проведення експериментальних досліджень з визначення показника екранування від проникнення диму крізь завісу (б); робочий момент створення задимлення у «загазованому відсіку» (в); робочий момент вимірювання прозорості задимленого середовища, що створене димом, який проник у «чистий відсік» крізь завісу за відкритої заглушки стенда (г)

Джерело: розробка авторів

Лабораторний стенд для проведення експериментальних досліджень з визначення показника екранування від проникнення диму через суцільну водяну завісу (далі – лабораторний стенд) складається із: прозорого корпусу (монолітний полікарбонат) 1, двох протилежних (повздовжніх) стінок 2, верху 3, боковин 4. Низ 5 корпусу відкритий. Всередині корпусу виконана стінка 6, що поділяє корпус 1 на два рівних за об'ємом відсіки з умовними назвами: «загазований відсік» 7 та «чистий відсік» 8. У стінці 6 виконано отвір 9 діаметром 300 мм, оснащений заглушкою 10. На стінці 4 відсіку 8 змонтовано водозлив 11, що формує завісу 12. Схематичний устрій водозливу 11

наведено на рис. 2. Водозлив 11 має живильний трубопровід 13 для подавання води. У робочому стані корпус 1 занурений у воду в металевому піддоні 14 на глибину  $(100 \pm 10)$  мм. Таким чином, герметичність корпусу 1 загалом та герметичність відсіків 7, 8 зокрема щодо навколишньої атмосфери та між собою (за закритої заглушки 10) забезпечується: герметичністю конструктивних елементів та стикових з'єднань між ними, а знизу – водяною подушкою.

Під час досліджень у відсіку 7 створюється задимлене середовище, наприклад димовою шашкою 17, оснащеною запальним гнітом. Підпалена димова шашка 17 під час проведення задимлення відсіку 7 підвішується доверху



корпусу 1 за допомогою підвісу 18.

Усередині відсіку 7 розміщено електричний вентилятор 15, що призначений для перемішування газового середовища (диму) за закритої заглушки 10 і для створення потоку газового середовища (диму) у бік відсіку 8 та завіси 12 за відкритої заглушки 10. Електричний вентилятор 15 оснащений регулятором обертів 16 для регулювання швидкості потоку газового середовища у межах  $(0,5 \pm 0,1)$  м/с. Контроль концентрації диму під час роботи лабораторного стенда виконується за допомогою комплексу для вимірювання прозорості газового середовища 19, який

розміщують зовні прозорих стінок 2 кожного із відсіків 7, 8.

Швидкість потоку газового середовища (диму) перед завісою 12, що створюється вентилятором 15, визначається цифровим анемометром 20 заздалегідь, перед проведенням досліджень.

Необхідна товщина завіси забезпечується регулюванням продуктивності водяного насоса 21, яка вимірюється витратоміром 22.

Засоби вимірювальної техніки, що використовуються під час проведення лабораторних експериментальних досліджень, наведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Засоби вимірювальної техніки, що використовуються під час проведення лабораторних експериментальних досліджень

Найменування ЗВТ	Діапазон вимірювань
Лінійка металева	від 0 мм до 1000 мм
Міліамперметр мультиметра Lini-T UT33C	від 0 мА до 200 мА
Барометр-анероїд М67	від 600 мм рт. ст. до 800 мм рт. ст.
Психрометр МВ-4М	від мінус 10 °С до 50 °С; від 10% до 100%
Цифровий анемометр AR 856	від 0,3 м/с до 45,0 м/с

Під час проведення лабораторних експериментальних досліджень застосовується розрахунковий метод визначення оптичної щільності газового середовища за результатами опосередкованого (непрямого) вимірювання прозорості задимленого середовища у «чистому відсіку» стенда, яка є меншою від прозорості чистого повітря внаслідок проникнення диму із «задимленого відсіку» без застосування завіси та кризь завісу за різних значень її товщини.

Показник (коєфіцієнт) екранування від проникнення диму через завісу  $H_d$  (%) визначається за формулою:

$$H_d = \frac{D_1 - D_i}{D_1} \cdot 100\%, \quad (3)$$

де:  $D_1$  – максимальна оптична щільність диму в «чистому відсіку», що не захищений завісою;

$D_i$  – максимальна оптична щільність диму в «чистому відсіку», що

захищений завісою.

Оптична щільність диму  $D_i$  визначається за показами міліамперметра комплексу вимірювання прозорості газового середовища за формулою:

$$D_i = 1g \frac{I_0}{I_{di}}, \quad (4)$$

де:  $I_0$  – значення показів міліамперметра комплексу вимірювання прозорості газового середовища у незадимленому середовищі (чисте повітря), мА;

$I_{di}$  – значення показів міліамперметра комплексу вимірювання прозорості газового середовища у задимленому середовищі (через кожні 30 с з початку експерименту), мА.

Товщина завіси ( $B$ , мм) визначається за формулою (2).

Продуктивність водяного насоса (витрата води з водозливу)  $Q$  (м<sup>3</sup>/с) визначається за допомогою витратоміра води.

Послідовність проведення досліджень була такою. На «загазованому відсіку» 7 встановлювали комплекс для вимірювання прозорості газового середовища 20 та розпочинали заповнення відсіку 7 димом. У разі досягнення показів міліамперметра 23 величини  $(8,0 \pm 0,1)$  мА\* подавання диму закінчували. Вмикали вентилятор 15. Давали витримку протягом не менше 120 с для того, щоб дим рівномірно розподілився в об'ємі відсіку 7, після чого остаточно фіксували покази міліамперметра 23. Потім встановлювали комплекс для вимірювання прозорості газового середовища 20 на відсіку 8 та впевнювалися, що покази його міліамперметра відповідають показам для незадимленого середовища (чистого повітря). Після цього у передбачений конструкцією стенда дистанційний спосіб відкривали заглушку 10. Розпочинали фіксацію показів міліамперметра через кожні 30 с до досягнення стабілізації значення показника у часі –  $(15 \pm 2)$  мА, що свідчило про рівномірне розподілення диму у відсіках 7, 8 і насамкінець завершували роботу – вимикали стенд та

провітрювали відсіки 7, 8.

*Примітка.\* Наведена величина сили струму  $(8,0 \pm 0,1)$  мА відповідає досягнутій у відсіку (згідно з формулою (4) –  $D_i = \lg 20/8 = 0,4$ ) середовища оптично щільного диму (згідно з класифікацією). Для порівняння: оптична щільність світлофільтрів захисних масок газо-, електрозварювальників для різних марок скла перебуває у межах від 0,5 до 4,5.*

Аналогічно виконували дослідження із застосуванням завіси 12, яку вмикали заздалегідь, перед відкриттям заглушки 10. Фіксацію показів міліамперметра 23 також виконували через кожні 30 с до стабілізації певного значення показника у часі. Дослідження проводили для різних витрат води з водозливу (для різної товщини завіси).

Результати лабораторних експериментальних досліджень наведено у табл. 4, де вказано середньоарифметичні значення вимірюваних та розрахованих показників із трьох дослідів щодо кожного випробування. Обробка результатів виконувалась за формулами 2, 3, 4. Зведені результати досліджень наведено графічно на рис. 4.

Таблиця 4 – Зведені результати лабораторних експериментальних досліджень з визначення коефіцієнта екранування від проникнення диму крізь завісу

	Тривалість експерименту, хв									
	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	
Показники середовища у «чистому відсіку», що не захищене завісою, мА, та оптична щільність задимленого середовища										
Покази міліамперметра, мА	22,2	18,5	16,8	15,7	15,2	15,1	15,2	15,3	15,4	
Оптична щільність середовища $D_i$	0,00	0,08	0,12	0,15	0,16	0,17	0,16	0,16	0,16	
Показники середовища у «чистому відсіку», що захищене завісою (витрата води 0,87 л/с, товщина завіси 0,5 мм), мА, та оптична щільність задимленого середовища										
Покази міліамперметра, мА	22,0	19,6	17,1	14,2	15,9	16,2	16,1	16,1	16,2	
Оптична щільність середовища $D_i$	0,00	0,05	0,11	0,15	0,14	0,13	0,14	0,14	0,13	
Показники середовища у «чистому відсіку», що захищене завісою (витрата води 1,74 л/с, товщина завіси 1,0 мм), мА, та оптична щільність задимленого середовища										
Покази міліамперметра, мА	22,1	20,1	18,0	17,1	16,4	16,7	16,7	16,7	16,7	
Оптична щільність середовища $D_i$	0,00	0,04	0,09	0,11	0,13	0,12	0,12	0,12	0,11	
Показники середовища у «чистому відсіку», що захищене завісою (витрата води 3,48 л/с, товщина завіси 2,0 мм), мА, та оптична щільність задимленого середовища										
Покази міліамперметра, мА	22,0	19,1	17,9	17,1	16,6	16,9	17,2	17,2	17,2	
Оптична щільність середовища $D_i$	0,00	0,06	0,09	0,11	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11	

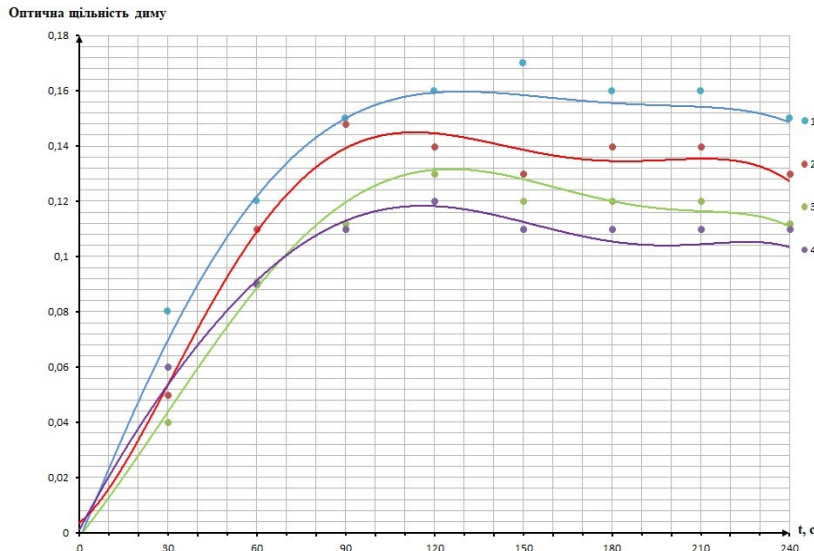


Рисунок 5 – Залежності оптичної щільності задимленого середовища за завісою від товщини завіси:

- 1 – оптична щільність диму в «чистому відсіку», що не захищений завісою;
- 2 – оптична щільність диму в «чистому відсіку», що захищений завісою з витратою води 0,87 л/с (товщина завіси 0,5 мм). Розрахунковий коефіцієнт екранування від проникнення диму крізь завісу  $H_0 = 12,5\%$ ;
- 3 – оптична щільність диму у «чистому відсіку», що захищений завісою з витратою води 1,74 л/с (товщина завіси 1,0 мм). Розрахунковий коефіцієнт екранування від проникнення диму крізь завісу  $H_0 = 18,8\%$ ;
- 4 – оптична щільність диму в «чистому відсіку», що захищений завісою з витратою води 3,48 л/с (товщина завіси 2,0 мм). Розрахунковий коефіцієнт екранування від проникнення диму крізь завісу  $H_0 = 25,0\%$

Джерело: розробка авторів

Експериментальні дослідження з визначення показника екранування від проникнення газоподібних CO та CO<sub>2</sub> крізь завісу виконувались на лабораторних стендах, за основу яких взято конструкцію, що наведена на рис. 3. Водночас лабораторні стенди було оснащено системами подавання газоподібних: CO (газ отримували одним із відомих лабораторних способів – через хімічне розкладання мурашиної кислоти під час нагрівання у суміші з концентрованою

сірчаною кислотою) та CO<sub>2</sub> (подавали з балона зі скрапленим CO<sub>2</sub>), а також двома газоаналізаторами Testo 310 для визначення у відсіках 7 та 8 об'ємної концентрації наведених газів під час досліджень.

Загальний вигляд лабораторних стендів для проведення експериментальних досліджень з визначення показника екранування від проникнення крізь завісу CO та CO<sub>2</sub> наведено на рис. 6.



а)



б)

Рисунок 6 – Загальний вигляд лабораторних стендів для проведення експериментальних досліджень з визначення показника екранування від проникнення крізь завісу: а) CO; б) CO<sub>2</sub>

Джерело: розробка авторів

Перед проведенням досліджень у відсіках 7 кожного із лабораторних стендів (за закритої заглушки 10) створювали робочі концентрації: CO –  $(4000 \pm 40)$  ppm, CO<sub>2</sub> –  $(10 \pm 1)$  %, які вибрані за умови того, що згідно із джерелами у разі перевищення таких концентрацій цих газів у повітрі відбувається отруєння людей і тварин із подальшим летальним кінцем. Впевнювалися, що концентрації CO та CO<sub>2</sub> у відсіках 8 мають нульові значення. Після цього у передбаченій конструкції стендів дистанційний спосіб відкривали заглушки 10. Розпочинали фіксацію показів збільшення концентрації газів у відсіку 8 через кожні 30 с до досягнення величин: для CO –  $(2000 \pm 20)$  ppm і для CO<sub>2</sub> –  $(5,0 \pm 0,5)$  %, що свідчило про рівномірне розподілення газів у відсіках 7, 8. Подальші методи проведення досліджень аналогічні наведеним вище для досліджень з визначення показника екранування від проникнення диму крізь завісу.

Під час проведення лабораторних експериментальних досліджень застосовувався метод прямого

вимірювання величин концентрацій CO та CO<sub>2</sub>, що проникли у «чистий відсік» крізь завісу, за різних значень її товщини та величин концентрацій газів без застосування завіси.

Показник (коефіцієнт) екранування від проникнення газоподібних CO та CO<sub>2</sub> крізь завісу  $H_{CO, CO_2}$ , (%) визначався за формулою:

$$H_{CO, CO_2} = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \cdot 100\%, \quad (5)$$

де:  $C_1$  – максимальна концентрація газоподібних CO або CO<sub>2</sub> у «чистому відсіку», що не захищений завісою, %;

$C_2$  – максимальна концентрація газоподібних CO або CO<sub>2</sub> у «чистому відсіку», що захищений завісою, %.

Результати лабораторних експериментальних досліджень для CO наведено у табл. 5, для CO<sub>2</sub> – у табл. 6, де вказано середньоарифметичні значення вимірних показників із трьох дослідів щодо кожного випробування. Обробка результатів виконувалась за формулами 2, 5. Зведені результати досліджень наведено графічно на рис. 7, 8.

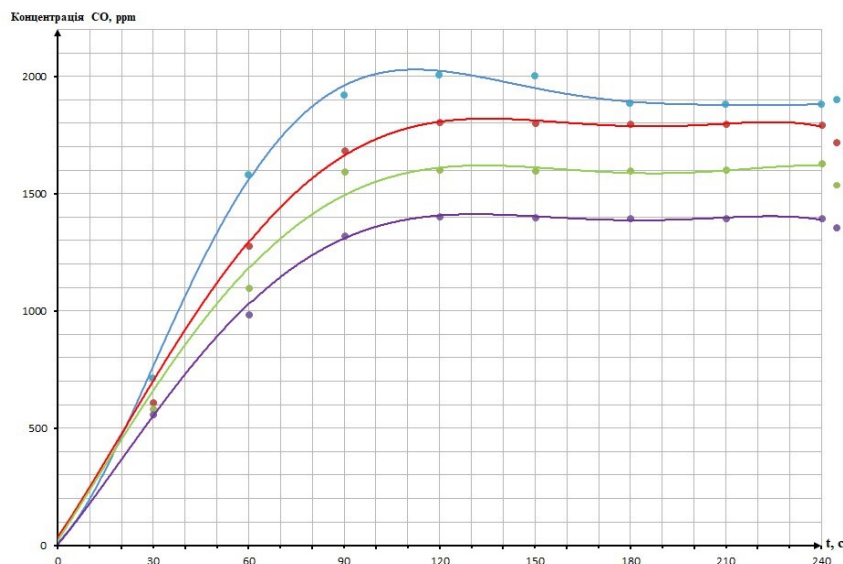


Рисунок 7 – Залежності концентрації CO, що проник крізь завісу, від товщини завіси 1 – концентрація CO у «чистому відсіку», що не захищений завісою, ppm.; 2 – концентрація CO у «чистому відсіку», що захищений завісою з витратою води 0,87 л/с (товщина завіси 0,5 мм), ppm. Розрахунковий коефіцієнт екранування від проникнення газоподібного CO крізь завісу  $H_{CO} = 10\%$ ; 3 – концентрація CO у «чистому відсіку», що захищений завісою з витратою води 1,74 л/с (товщина завіси 1,0 мм), ppm. Розрахунковий коефіцієнт екранування від проникнення газоподібного CO крізь завісу  $H_{CO} = 20\%$ . 4 – концентрація CO у «чистому відсіку», що захищений завісою з витратою води 3,48 л/с (товщина завіси 2,0 мм), ppm. Розрахунковий коефіцієнт екранування від проникнення газоподібного CO крізь завісу  $H_{CO} = 30\%$ .

Джерело: розробка авторів

Таблиця 5 – Зведені результати лабораторних експериментальних досліджень з визначення коефіцієнта екранування від проникнення газоподібного CO крізь завісу

Тривалість експерименту, хв								
0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
Концентрація CO у «чистому відсіку», що не захищений завісою, ppm								
0	712	1580	1920	2006	1895	1885	1881	1880
Концентрація CO у «чистому відсіку», що захищений завісою з витратою води 0,87 л/с, (товщина завіси 0,5 мм), ppm								
0	611	1280	1684	1805	1802	1796	1797	1794
Концентрація CO у «чистому відсіку», що захищений завісою з витратою води 1,74 л/с, (товщина завіси 1 мм), ppm								
0	581	1100	1594	1603	1600	1600	1602	1601
Концентрація CO у «чистому відсіку», що захищений завісою з витратою води 3,48 л/с, (товщина завіси 2 мм), ppm								
0	560	984	1322	1404	1400	1395	1388	1390

Таблиця 6 – Зведені результати лабораторних експериментальних досліджень з визначення коефіцієнта екранування від проникнення газоподібного CO<sub>2</sub> крізь завісу

Тривалість експерименту, хв								
0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
Концентрація CO <sub>2</sub> у «чистому відсіку», що не захищений завісою, %								
0,00	0,95	4,52	5,22	5,25	5,18	5,14	5,13	5,11
Концентрація CO <sub>2</sub> у «чистому відсіку», що захищений завісою з витратою води 0,87 л/с, (товщина завіси 0,5 мм), %								
0,00	0,92	4,16	4,39	4,56	4,32	4,30	4,31	4,23
Концентрація CO <sub>2</sub> у «чистому відсіку», що захищений завісою з витратою води 1,74 л/с, (товщина завіси 1 мм), %								
0,00	1,75	3,38	3,88	4,04	4,00	3,80	3,77	3,75
Концентрація CO <sub>2</sub> у «чистому відсіку», що захищений завісою з витратою води 3,48 л/с, (товщина завіси 2 мм), %								
0,00	2,26	2,74	3,26	3,51	3,36	3,49	3,35	3,20

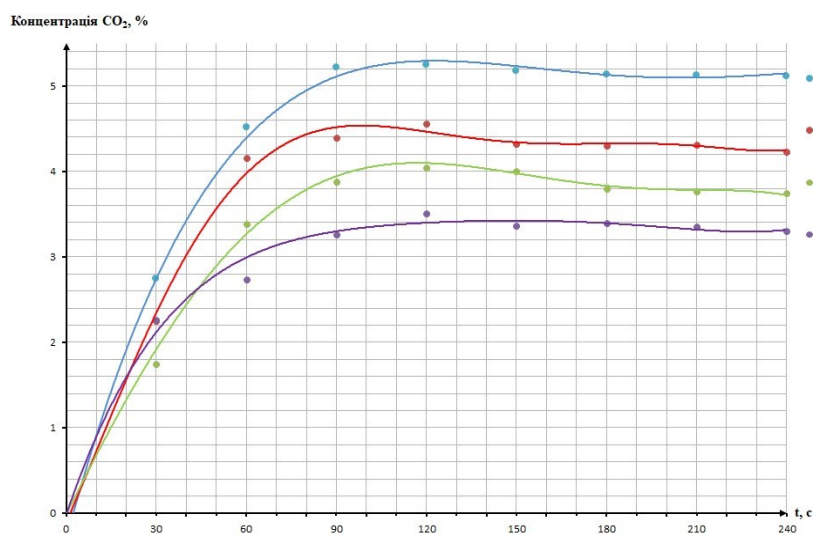


Рисунок 8 – Залежності концентрації CO<sub>2</sub>, що проник крізь завісу, від товщини завіси: 1 – концентрація CO<sub>2</sub> у «чистому відсіку», що не захищений завісою, %; 2 – концентрація CO<sub>2</sub> у «чистому відсіку», що захищений завісою з витратою води 0,87 л/с (товщина завіси 0,5 мм) %. Розрахунковий коефіцієнт екранування від проникнення газоподібного CO<sub>2</sub> крізь завісу  $H_{CO_2} = 13\%$ ; 3 – концентрація CO<sub>2</sub> у «чистому відсіку», що захищений завісою з витратою води 1,74 л/с (товщина завіси 1,0 мм) %. Розрахунковий коефіцієнт екранування від проникнення газоподібного CO<sub>2</sub> крізь завісу  $H_{CO_2} = 23\%$ ; 4 – концентрація CO<sub>2</sub> у «чистому відсіку», що захищений завісою з витратою води 3,48 л/с (товщина завіси 2,0 мм) %, Розрахунковий коефіцієнт екранування від проникнення газоподібного CO<sub>2</sub> крізь завісу  $H_{CO_2} = 33\%$

**Висновки та напрями подальших досліджень.**

1. Наведене стендове обладнання для проведення лабораторних досліджень екранувальної здатності водяних завіс від проникнення радіаційного теплового випромінювання, диму, небезпечних газоподібних продуктів горіння (СО та СО<sub>2</sub>) має конструктивне виконання на рівні провідних аналогів та сучасне метрологічне забезпечення, що разом із розробленими методиками досліджень дає змогу проводити експериментальні дослідження на високому науково-технічному рівні з достовірними результатами.

2. Отримані результати експериментальних лабораторних досліджень свідчать про: високу ефективність завіс щодо екранувальної здатності від проникнення теплових потоків у інфрачервоному діапазоні довжин хвиль випромінювання (теплові потоки створювались за допомогою радіаційної газової панелі) – коефіцієнт екранування від 87% до 96% за товщини завіси від 0,22 мм до 0,57 мм; помірну ефективність щодо екранувальної здатності від проникнення диму, СО та

*Джерело:* розробка авторів

СО<sub>2</sub> – коефіцієнт екранування від 10% до 33% за товщини завіси від 0,50 мм до 2,00 мм.

Незначний нахил графіків № 1 від горизонталі на ділянці часу досліджень від 2 хв до 4 хв, імовірно, пов'язаний з певною негерметичністю корпусу стенда, особливостями процесу перемішування середовища вентилятором, похибками вимірювань; нахил графіків № 2, № 3, № 4 – з негерметичністю відповідного відсіку стенда, похибками вимірювань, а також осадженням і вимиванням диму та газів завісою.

Прямого впливу показників ступеня розчинності у воді СО та СО<sub>2</sub> на коефіцієнти екранування від проникнення цих газів через завісу під час цих досліджень не встановлено.

3. Результати лабораторних досліджень у подальшому планується використати під час проведення натурних досліджень завіс.

4. Результати лабораторних та натурних випробувань будуть основою для розроблення рекомендацій щодо застосування завіс у системах протипожежного захисту.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Бенедюк В. С., Корнієнко О. В., Мельник В. П., Стилик І. Г., Тимошенко О. М. Шляхи та проблемні питання впровадження водяних протипожежних завіс в Україні. *Науковий вісник : Цивільний захист та пожежна безпека*. № 2(10). 2020. С. 22–31.
2. Виноградов А. Г. Теплозахисні властивості суцільної плівки води. *Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: матеріали міжнар. наук.-техніч. конференції*, 26 вер. 2021, Київ-Херсон. С. 214–216.
3. Дренчерные оросители производства Пожнефтехим для эффективных противопожарных водяных завес большой высоты. URL: <https://neftgaz.ru/Analysis/equipment/328491-drenchernye-orositeli-proizvodstva-pozhneftekhim-dlya-effektivnykh-protivopozharnykh-vodyanykh-zaves/> (дата звернення : 17.08.2021).
4. Болдырев В. В. Гидравлический расчет водяных завес как трубопроводов с попутным расходом. *Водоснабжение и санитарная техника*. № 11. 2016. С. 64–70.
5. Гаврилко О. А., Білінський Б. О. Вплив водяних струменів в'ялового типу на тепловий захист під час пожеж. *Вісник національного університету «Львівська політехніка»*. 2017. № 877. С. 33–37.
6. Guide for Transformer Fire Safety Practices. Working Group A2.33. Cigre, Paris, France. 2013. p. 139. URL : [https://static.mimaterials.com/midel/documents/sales/Guide\\_for\\_Transformer\\_FireSafety\\_Practices.pdf](https://static.mimaterials.com/midel/documents/sales/Guide_for_Transformer_FireSafety_Practices.pdf) (дата звернення : 26.08.2021).
7. Федоров А.В. и др. Огнезащита объектов нефтегазового комплекса на основе применения водяных завес. *Научно-аналитический журнал : Вестник*. № 3. 2017. С. 17–23.
8. Hui Zhong, Guohua Chen, Saihua Jiang. A novel method for evaluation of fire prevention by using water curtain with large droplets. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Vol. 43. 2016. P. 25–32.
9. Zhigang Wang, Xishi Wang, Yanqing Huang. Experimental study on fire smoke control using water mist curtain in channel. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 342. 2018. P. 231–241.
10. Излив водопада «Aquafall-1500» URL : <http://www.fontanov.net@gmail.com> (дата звернення : 10.03.2021).

**REFERENCES**

1. Benediuk, V. S., Korniienko, O. V., Melnyk, V. P., Stylyk I. H., Tymoshenko, O. M. (2020). Shliakhy ta problemni pytannia vprovadzhenia vodianykh protypozhezhnykh zavis v Ukraini [Ways and problems of implementation of water curtains in Ukraine] *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, 2, 22 – 31 [in Ukrainian].

2. Vynogradov, A. H. (2020). Teplozakhysni vlastyivosti sutsilnoi plivky vody [Thermal protective properties of a continuous film of water]. *Hidroaeromekhanika v inzhenerinii praktytsi*, Materialy mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii [Hydromechanics in engineer practice, Proceedings of international science-technical Conference], Kyiv-Kherson [in Ukrainian].
3. Drenchernue orosytely proyzvodstva Pozhneftekhym dlia efektyvnykh protyvopozharnukh vodianukh zaves bolshoi vusotu [Deluge sprinklers manufactured by Pozhneftehim for effective high altitude fire fighting water curtains]. Retrieved from <https://neftegaz.ru/analysis/equipment/328491-drenchernye-orositeli-proizvodstva-pozhneftekhim-dlya-effektivnykh-protivopozharnykh-vodyanykh-zaves/> [in Russian].
4. Boldyirev, V. V. (2017). Gidravlicheskiy raschet vodyanykh zaves kak truboprovodov s poputnyim rashodom [Hydraulic calculation of water curtains as pipelines with associated flow]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*, 11, 64–70 [in Russian].
5. Havrylko, O. A., Bilinskyi B. O. (2017). Vplyv vodiannykh strumeniv viialovoho typu na teplovyi zakhyst pid chas pozhezh [Effect of fan-type water jets on thermal protection during fires] *Visnyk natsionalnoho universytetu Lvivska politekhnika*. 877, 33–37. [in Ukrainian].
6. Guide for Transformer Fire Safety Practices. Working Group A2.33. Cigre, Paris, France. 2013. p.139. Retrieved from [https://static.mimaterials.com/midel/documents/sales/Guide\\_for\\_Transformer\\_Fire\\_Safety\\_Practices.pdf](https://static.mimaterials.com/midel/documents/sales/Guide_for_Transformer_Fire_Safety_Practices.pdf) [in English].
7. Fedorov, A. V. i dr. (2017) Ognezaschita ob'ektov neftegazovogo kompleksa na osnove primeneniya vodyanykh zaves [Fire protection of objects of the oil and gas complex based on the use of water curtains]. *Nauchno - analiticheskiy zhurnal: Vestnik*. 3, 17–23 [in Russian].
8. Hui Zhong, Guohua Chen, Saihua Jiang. (2016). A novel method for evaluation of fire prevention by using water curtain with large droplets. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 43, 25–32 [in English].
9. Zhigang Wang, Xishi Wang, Yanqing Huang. (2018) Experimental study on fire smoke control using water mist curtain in channel. *Journal of Hazardous Materials*, 342, 231–241 [in English].
10. Izliv vodopada «Aquafall-1500» [The flow of the waterfall «Aquafall-1500»] Retrieved from <http://www.fontanov.net@gmail.com> [in Russian].

## RESULTS OF LABORATORY RESEARCH OF SHIELDING ABILITY OF WATER CURTAIN FROM PENETRATION OF DANGEROUS FACTORS OF FIRE

V. Benedyuk, I. Stylyk, O. Tymoshenko, R. Lihniiovskii, A. Onyshchuk, V. Prysyzhnyuk  
 Institute of Public Administration and Research in Civil Protection, Ukraine

### KEYWORDS:

fire, fire protection, water curtain, density of heat radiation flow, optical smoke density, concentration of dangerous factors of fire, shielding ability, technical devices for creation of water curtains

### ANNOTATION

These materials are a continuation of previously published in the Scientific Bulletin «Civil Protection and Fire Safety» № 2(10) (2020) materials on water curtain research. This article presented materials of searching and analyzing the latest available publications on this subject, which showed, that research in the creation of effective fire protection systems, in particular, water curtains, are continued in Ukraine and abroad to date, which confirms their relevance and importance. It has been established that despite the wide range of practical applications of water curtains, in the normative documents of Ukraine the issues of necessity and possibility of their installation, technical requirements and peculiarities of their design, including regarding the duration of work, substantiation of cost characteristics, methods of their testing are insufficiently reflected and require additions and clarifications. Presented bench equipment for laboratory researches of shielding ability of water curtains from penetration: heat radiation flow, smoke, dangerous gaseous combustion products: carbon monoxide (II) – CO and carbon monoxide (IV) – CO<sub>2</sub> has a design at the level of leading analogs and modern metrological support, which, together with the developed research methods, allows to conduct experimental researches at a high scientific and technical level with reliable results. The obtained results of experimental laboratory researches showed high efficiency of curtains in terms of shielding ability from penetration: heat fluxes in the infrared range of radiation wavelengths (heat fluxes were created by a radiation gas panel) – shielding coefficient from 87% to 96%, with calculated (theoretical) thickness of curtains from 0.22 mm to 0.57 mm; and moderate efficiency in terms of shielding ability from smoke penetration (created by smoke bombs), CO and CO<sub>2</sub> (supplied in a gaseous state) – shielding coefficient from 10% to 33%, with the calculated (theoretical) thickness of the water curtain from 0.50 mm to 2.00 mm. The results of laboratory experimental researches will be used in conducting field researches of water curtains. The final results of laboratory and field researches will be the basis for the development of recommendations for using water curtains in fire protection systems.

УДК 351.861

## ОСОБЛИВОСТІ ПІДТРИМАННЯ УХВАЛЕННЯ АНТИКРИЗОВИХ РІШЕНЬ В УМОВАХ ВИНИКНЕННЯ ГЕОФІЗИЧНИХ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2.65-79>

Агазаде Т. Х.<sup>1</sup>, ORCID iD 0000-0002-0165-1118  
Тютюник В. В.<sup>2\*</sup>, ORCID iD 0000-0001-5394-6367  
Чорногор Л. Ф.<sup>3</sup>, ORCID iD 0000-0001-5777-2392  
Тютюник О. О.<sup>4</sup>, ORCID iD 0000-0002-3330-8920

\*E-mail: tutunik\_v@ukr.net

<sup>1</sup>Державна Протипожежна Служба МНС Азербайджану

<sup>2</sup>Національний університет цивільного захисту України, Україна

<sup>3</sup>Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Україна

<sup>4</sup>Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, Україна

### ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 12.09.2022

Пройшла рецензування: 10.10.2022

### КЛЮЧОВІ СЛОВА:

геофізична надзвичайна ситуація, ймовірність виникнення землетрусу, підтримання ухвалення антикризових рішень, ситуаційний центр, система цивільного захисту, виконання задач за призначенням, мінімізація наслідків

### АНОТАЦІЯ

Розроблено ймовірнісну математичну модель оцінки можливості виникнення землетрусів магнітудою  $\geq 5$  на окремих сейсмічно активних територіях Земної кулі залежно від її рівня сейсмічної активності. Розроблена модель базується на уявленнях про динаміку фізичних процесів, які відбуваються в системі нелінійних енергетичних взаємодій Сонце – Земля – Місяць та впливають на рівень сейсмічної активності окремої сейсмічно активної території Земної кулі. Як вхідні дані щодо визначеності параметрів розподілу Парето використані результати спостережень Головного центру спеціального контролю Державного космічного агентства України за рівнем сейсмічної активності Земної кулі за період 2009–2021 рр. Результати моделювання лягли в основу удосконалення функціонування ситуаційних центрів щодо процедури підтримання ухвалення антикризових рішень на виконання структурними підрозділами системи цивільного захисту задач за призначенням, які спрямовані на мінімізацію наслідків геофізичних надзвичайних ситуацій. Інформаційно-технічна реалізація розробленої математичної моделі в інтересах удосконалення процедури підтримання ухвалення антикризових рішень передбачає комплексне виконання в системі єдиного часу таких п'яти функцій: 1) безперервний глобальний моніторинг рівня сейсмічної активності Земної кулі; 2) безперервний моніторинг сейсмічної активності окремої території Земної кулі; 3) оцінка (за результатами моніторингових спостережень) ймовірностей виникнення землетрусів на окремих сейсмічно активних територіях Земної кулі залежно від рівня її сейсмічної активності; 4) реалізація на окремій сейсмічно активній території Земної кулі (за результатами оцінки ймовірності виникнення на цій території землетрусу) режиму підвищеної готовності системи цивільного захисту; 5) реалізація на окремій сейсмічно активній території Земної кулі (за результатами безперервного моніторингу її сейсмічної активності) режиму «Геофізична надзвичайна ситуація».

**Постановка проблеми.** З огляду на широкий спектр проблем сьогодення, що виникають під час небезпечних для території Земної кулі геофізичних надзвичайних ситуацій (далі – НС) та

призводять до порушень нормальних умов життєдіяльності суспільства, пов'язаних зі значними соціально-економічними наслідками, є нагальна потреба у розробленні ефективних заходів



оптимального управління процесами своєчасного виявлення потенційних джерел небезпеки і мінімізації наслідків від землетрусів [1–6].

Перспективним напрямом розроблення таких заходів є створення

геоінформаційної системи безпеки території та населення держави від геофізичних НС, функції якої реалізовано за принципом класичного контуру управління та схематично наведено на рис. 1 [7].

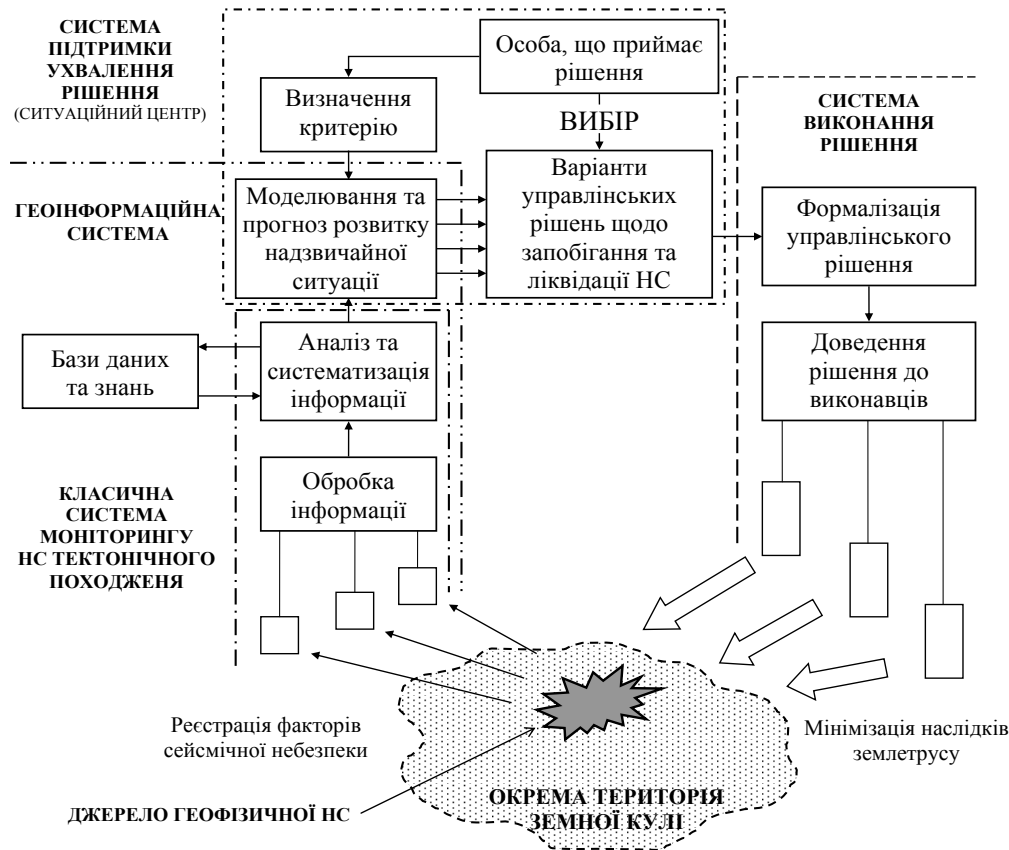


Рисунок 1 – Схема структури геоінформаційної системи безпеки від геофізичних надзвичайних ситуацій як засобу управління

Джерело: [7].

Згідно з рис. 1 ефективність функціонування геоінформаційної системи безпеки від геофізичних НС здебільшого залежить від роботи системи підтримання ухвалення антикризових рішень, яка базується на синтезі інформаційно-комунікаційних технологій, засобів накопичення та представлення інформації, комп'ютерних засобів підтримання ухвалення рішень. Зазначена система може являти собою ситуаційний центр, під яким розуміється сукупність методів, алгоритмів, моделей ухвалення управлінських рішень і комплексу технологій як підтримувальних, так і тих, що реалізують ці рішення [8–11].

Розроблення таких підходів до ухвалення ефективних антикризових рішень щодо реалізації структурними підрозділами системи цивільного захисту завчасних дій за призначенням, які спрямовані на мінімізацію наслідків геофізичних НС, є актуальною задачею.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Результати проведеного аналізу різних джерел даних, зокрема інформаційних інтернет-ресурсів [12–26], свідчать про те, що сучасні системи безпеки під час геофізичних НС функціонують за принципом побудови (згідно з даними рис. 1) геоінформаційних систем сейсмічного моніторингу території

Земної кулі в глобальному та національному масштабах, без надання структурним підрозділам системи цивільного захисту прогностичної інформації для завчасної підготовки їх до ефективного виконання задач за призначенням щодо мінімізації наслідків геофізичних НС.

З огляду на зазначене одним із перспективних напрямів розвитку систем безпеки під час геофізичних НС є розвиток наукових основ створення комплексної системи безпеки, де реалізуються підходи щодо взаємодії між функціями моніторингу, підтримання ухвалення антикризових рішень та їх виконання. Ефективність функціонування такої системи безпеки залежить від роботи системи підтримання ухвалення антикризових рішень, особливою реалізацією якої є створення ситуаційних центрів [8–10; 27]. Водночас ефективне функціонування ситуаційних центрів як сполучної ланки між системою моніторингу НС та системою цивільного захисту потребує розроблення адекватних прогностичних моделей для підтримання ухвалення антикризових рішень під час виникнення НС.

На сьогодні підґрунтям прогностичних сейсмічних спостережень є знання фізичних законів механізму землетрусів і контроль стану фізичних полів у сейсмоактивній зоні [28–29]. Також спостерігається розвиток на базі інформаційних технологій статистико-ймовірнісних підходів щодо прогнозування землетрусів, а саме – в [30] наведені результати дослідження прогнозування землетрусів у північно-західному районі В'єтнаму за допомогою нейромережевих технологій. Водночас результати аналізу статистичних даних рідкісних руйнівних НС вказують на те, що ці події значно залежать від степеневого закону розподілу ймовірності. Так, у [31–32] наведені результати використання закону Ріхтера-Гутенберга для оцінки кількості землетрусів від їх енергії. Подібний підхід також використовується для прогнозу

інтенсивності виникнення різних НС природного й техногенного характеру та оцінки рівня соціального збитку під час виникнення НС [33–36].

Одним із перспективних напрямів розвитку цього підходу стосовно прогнозування землетрусів є дослідження характеру поведінки функції розподілу землетрусів в області рідкісних руйнівних землетрусів на основі використання положень теорії екстремальних значень та в межах моделі мультиплікативного каскаду [37]. Отже, розроблення математичної моделі функціонування ситуаційного центру щодо оцінки ймовірності виникнення землетрусів із магнітудою  $\geq 5$  на окремій сейсмічно активній території Земної кулі (як елементу каскадного розвитку сейсмічної активності Земної кулі) та ухвалення ефективних антикризових рішень щодо реалізації структурними підрозділами системи цивільного захисту завчасних дій за призначенням, які спрямовані на мінімізацію наслідків від геофізичних НС, і визначають напрям наших наукових досліджень у галузі цивільного захисту.

**Мета статті.** Метою цієї роботи є удосконалення процедури підтримання ухвалення антикризових рішень щодо реалізації структурними підрозділами системи цивільного захисту завчасних дій за призначенням, які спрямовані на мінімізацію наслідків від геофізичних НС.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання: 1) розробити ймовірнісну математичну модель оцінки можливості виникнення землетрусів магнітудою  $\geq 5$  на окремій сейсмічно активній території Земної кулі залежно від рівня її сейсмічної активності; 2) удосконалити процедуру підтримання ухвалення антикризових рішень щодо режимів функціонування системи цивільного захисту та виконання структурними підрозділами системи цивільного захисту задач за призначенням, які спрямовані на мінімізацію наслідків геофізичних НС, залежно від результатів моніторингу та оцінки ймовірності

виникнення землетрусів на окремій сейсмічно активній території Земної кулі.

Особливості прояву залежності між сейсмічною активністю окремої території Земної кулі та рівнем її сейсмічної активності розглянемо на базі аналізу динаміки фізичних процесів, що відбуваються в енергетичній системі Сонце – Земля – Місяць. Ці процеси можна схематично показати на рис. 2–4 та охарактеризувати такими особливостями просторових будов у межах Сонячної системи [38–40].

1. Вісь обертання Землі в небесній сфері описує складну хвилеподібну траєкторію, точки якої розташовані на кутовій відстані, в середньому близько  $23,5^{\circ}$  від полюса екліптики (рис. 2). Вершина конуса збігається з центром Землі. Точки рівнодення та сонцестояння рухаються по екліптиці назустріч Сонцю. Моменти сил тяжіння, які діють на екваторіальні здуття, змінюються залежно

від положень Місяця та Сонця щодо Землі. Якщо Місяць і Сонце перебувають в площині земного екватора, моменти сил зникають, а якщо схилення Місяця та Сонця максимальні, то і величина моменту сил найбільша. Внаслідок коливань моментів сил тяжіння спостерігаються нутації осі обертання Землі, які складаються з ряду невеликих періодичних коливань. Основне з них має період 18,6 року – час звернення вузлів орбіти Місяця. Рух із цим періодом відбувається по еліпсу. Велика вісь еліпса перпендикулярна напрямку прецесійного руху і дорівнює  $18,4''$ ; мала – паралельна йому і дорівнює  $13,7''$ . Далі за величиною амплітуди йдуть складові з періодом 0,5 року, 13,7 діб, 9,3 року, 1 рік, 27,6 діб тощо, тому траєкторія має вигляд «тонких мережив» (наведено на збільшеному фрагменті в лівій частині рис. 2).

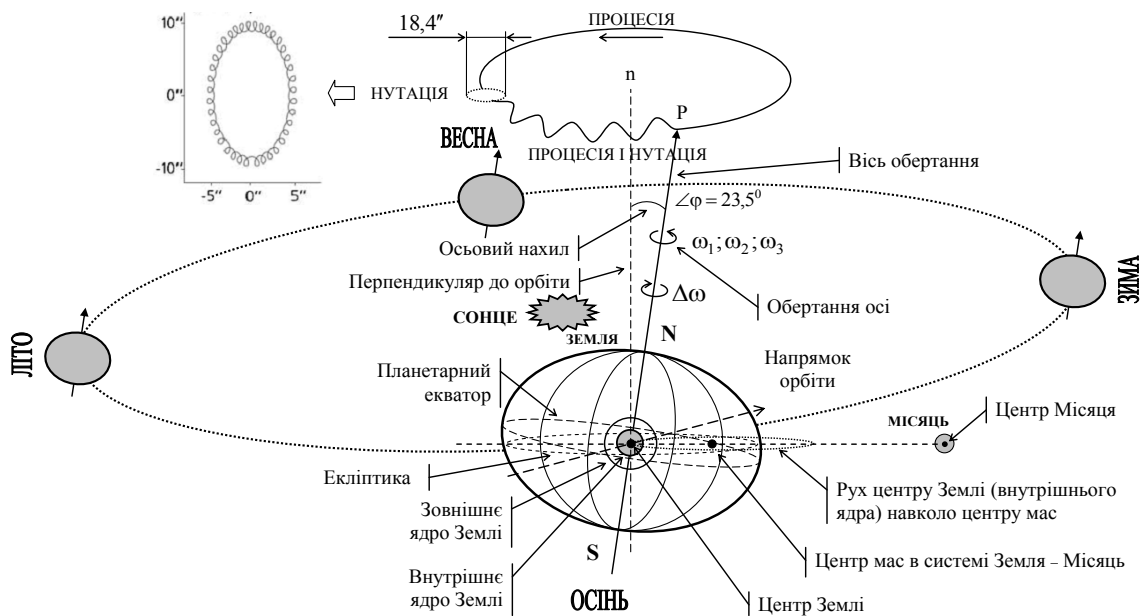


Рисунок 2 – Схема руху внутрішнього ядра Землі в системі нелінійних енергетичних взаємодій Сонце – Земля – Місяць

2. Унаслідок ексцентричного обертання оболонки Землі навколо зміщеного внутрішнього ядра виникає тиск з боку твердого внутрішнього ядра та навколишнього розплаву (зовнішнього ядра) на мантию, яке видавлює оболонку

зсередини. В інших частинах планети виникають сили, що стискають оболонку кулі, втягуючи її всередину до ядра. Зазначений процес має дві складові: вплив унаслідок річного переміщення центра внутрішнього ядра щодо центра Земної

кулі (рис. 2–4); вплив унаслідок ексцентричного обертання ядра щодо нижньої мантії, коли через різниці в кутових швидкостях обертання ядра та нижньої мантії ( $\omega_1$  – кутова швидкість обертання мантії;  $\omega_2$  – кутова швидкість обертання зовнішнього ядра;  $\omega_3$  – кутова швидкість обертання внутрішнього ядра;  $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$  – кутова швидкість повороту зовнішнього ядра щодо мантії («західний дрейф»)) спостерігаються зони підвищеного тиску та розрядження ( $P_1 \neq P_2$ , де  $P_1$  та  $P_2$  – показники тиску внутрішнього ядра Земної кулі на її поверхню), які впливають на рівень сейсмічної активності поверхні Земної кулі (рис. 3). Існування таких зон буде підтримуватися доти, доки є різниця в

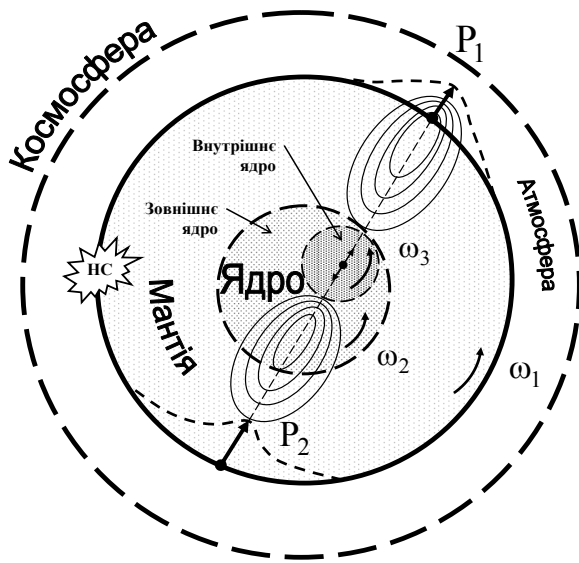


Рисунок 3 – Схема впливу коливань внутрішнього ядра на сейсмічну активність

5. У процесі просторово-коливального переміщення внутрішнього ядра Землі та його впливу на зовнішнє ядро підвищується ймовірність взаємного посилення або ослаблення об'ємних сейсмічних хвиль, а отже й можливість виникнення вторинних землетрусів  $Z'$ .

6. Не виключена можливість впливу поверхневих і об'ємних сейсмічних хвиль на напруженість в літосфері, що виникли

кутових швидкостях обертання та зміщення ядра.

3. У процесі переміщення літосферних плит (рис. 4) виникають внутрішні пружні напруження, які є енергетичними джерелами землетрусів  $Z_0$ . Глибина виникнення пружних напружень залежить від характеру переміщення плит. Відносний рух літосферних плит призводить до виникнення неглибоких (не глибше 20–25 км) джерел землетрусів, а занурення літосферних плит у мантію провокує появу джерел глибоких (що перевищують 70 км) землетрусів. Зі збільшенням відстані від кордону поділу літосферних плит знижується ймовірність виникнення пружних напружень – джерел землетрусів.

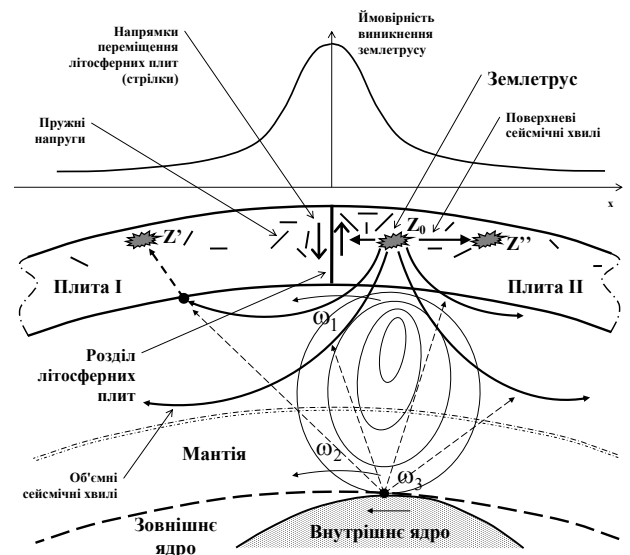


Рисунок 4 – Схема процесу виникнення землетрусів і поширення сейсмічної активності

поблизу землетрусу та провокують виникнення ланцюгової реакції поширення сейсмічної небезпеки  $Z''$ .

7. Встановлено, що внаслідок руху внутрішнього ядра Землі відбуваються територіально-часові зміни інтенсивності природного імпульсного електромагнітного поля Землі (ПЕМПЗ), що провокують аномальні процеси в атмосфері, іоносфері та магнітосфері.

Згідно з даними рис. 2–4 енергетична система Сонце – Земля – Місяць є складною. З огляду на це процес виникнення сейсмічної активності на Земній кулі в такій складній системі можна описати степеневими законами розподілу ймовірностей. Розподілом серед степеневих законів розподілу ймовірностей, що має велике практичне значення у разі прогнозу інтенсивності виникнення НС природного та техногенного характеру, є розподіл Парето [36], який задається щільністю ймовірностей

$$\rho(x) = \frac{\alpha}{\theta} \left( \frac{\theta}{x} \right)^{\alpha+1} \quad (1)$$

та функцією розподілу

$$F_x(x) = 1 - \left( \frac{\theta}{x} \right)^{\alpha} \quad (2)$$

за  $x > \theta$ .

Розроблення ймовірнісної математичної моделі оцінки можливості виникнення землетрусів магнітудою  $\geq 5$  на окремій сейсмічно активній території Земної кулі залежно від рівня її сейсмічної активності базувалося на визначеності параметрів розподілу Парето за результатами спостережень за рівнем сейсмічної активності Земної кулі, які наведені ГЦСК ДКА України [24], за період 2009–2021 рр. У математичній постановці ця задача має таке формулювання: отримано вибірку  $x_1, \dots, x_n$  щодо кількостей виникнення землетрусів на Земній кулі в інтервалах між землетрусами на окремій сейсмічно активній території Земної кулі. Необхідно визначити або з достовірною точністю оцінити параметри  $\alpha$  і  $\theta$ .

Необхідно вказати, що в роботі достатньо визначити параметр  $\alpha$ , оскільки параметр  $\theta$  визначається як мінімальний поріг, тобто мінімальна кількість виникнення землетрусів на Земній кулі в

інтервалах між землетрусами на окремій сейсмічно активній території Земної кулі.

Для оцінки параметрів розподілу за вибіркою найбільш часто використовується метод максимальної правдоподібності. У разі розподілу Парето щільність ймовірності того, що елементи вибірки набудуть значення  $x_1, \dots, x_n$ , якщо параметри розподілу Парето дорівнюють  $\alpha$  і  $\theta$ , становить:

$$G(x_1, \dots, x_n / \alpha, \theta) = \left( \frac{\alpha}{\theta} \right)^n \left( \frac{\theta^n}{x_1 \cdot \dots \cdot x_n} \right)^{\alpha+1}. \quad (3)$$

Звідси оцінка максимальної правдоподібності має вигляд:

$$\hat{\alpha} = \frac{n}{\ln x_1 + \dots + \ln x_n - n \ln \theta}, \quad (4)$$

де  $x_1, \dots, x_n$  – вибірка щодо кількостей виникнення землетрусів на Земній кулі в інтервалах між землетрусами на окремій сейсмічно активній території Земної кулі;  $n$  – розмір цієї вибірки.

Вираз (4) можливо представити таким чином:

$$\hat{\alpha} = \frac{n}{\ln \left( \frac{x_1}{\theta} \right) + \dots + \ln \left( \frac{x_n}{\theta} \right)}. \quad (5)$$

Моделювання щодо ймовірності виникнення землетрусу на окремій сейсмічно активній території Земної кулі проведено за результатами аналізу сейсмічної активності (за період 2009–2021 рр.) декількох окремих територій Земної кулі, з різним ступенем їх сейсмічної активності, який оцінено через проведення кластерного аналізу сейсмічно активних окремих територій Земної кулі. Результати кластеризації наведено у роботі [41]. З огляду на ці результати в роботі проведено аналіз сейсмічної активності таких трьох сейсмічно активних окремих територій планети, як: територія Японії (територія з відносно високим ступенем сейсмічної активності),

територія Азербайджану (територія з відносно середнім ступенем сейсмічної активності) та гір Вранча (територія Румунії з відносно низьким ступенем сейсмічної активності, але ця територія становить сейсмічну небезпеку для території України).

Результати моделювання ймовірності виникнення землетрусу в районі Японських островів залежно від поточного рівня сейсмічної активності Земної кулі можливо навести, як:

$$F_{\text{Японія}}(N_{\Sigma}) = 1 - \left( \frac{\theta_{\text{Японія}}}{N_{\Sigma}} \right)^{\hat{\alpha}_{\text{Японія}}} = 1 - \left( \frac{7}{N_{\Sigma}} \right)^{1,07}, \quad (6)$$

де  $\theta_{\text{Японія}} = 7$  – мінімальна кількість виникнення землетрусів магнітудою  $\geq 5$  на

$$F_{\text{Азербайджан}}(N_{\Sigma}) = 1 - \left( \frac{\theta_{\text{Азербайджан}}}{N_{\Sigma}} \right)^{\hat{\alpha}_{\text{Азербайджан}}} = 1 - \left( \frac{75}{N_{\Sigma}} \right)^{0,81}, \quad (7)$$

де  $\theta_{\text{Азербайджан}} = 75$  – мінімальна кількість виникнення землетрусів магнітудою  $\geq 5$  на Земній кулі в інтервалах між землетрусами, що виникли на території Азербайджану за період 2009–2021 рр.;  $\hat{\alpha}_{\text{Азербайджан}} = 0,81$  – оцінений параметр функції розподілу ймовірності виникнення землетрусу на території Азербайджану залежно від рівня сейсмічної активності Земної кулі.

Результати моделювання ймовірності виникнення землетрусу в горах Вранча залежно від рівня сейсмічної активності Земної кулі можливо навести, як:

$$F_{\text{Вранча}}(N_{\Sigma}) = 1 - \left( \frac{\theta_{\text{Вранча}}}{N_{\Sigma}} \right)^{\hat{\alpha}_{\text{Вранча}}} = 1 - \left( \frac{200}{N_{\Sigma}} \right)^{1,64}, \quad (8)$$

де  $\theta_{\text{Вранча}} = 200$  – мінімальна кількість виникнення землетрусів магнітудою  $\geq 5$  на Земній кулі в інтервалах між землетрусами, що виникли в горах Вранча за період 2009–2021 рр.;  $\hat{\alpha}_{\text{Вранча}} = 1,64$  – оцінений параметр функції розподілу ймовірності виникнення землетрусу в горах Вранча залежно від рівня сейсмічної активності Земної кулі.

Отримані ймовірнісні моделі (вирази (7)–(8)) оцінки можливості виникнення землетрусів магнітудою  $\geq 5$  на окремій сейсмічно активній території Земної кулі

Земній кулі в інтервалах між землетрусами, що виникли в районі Японських островів за період 2009–2021 рр.;  $\hat{\alpha}_{\text{Японія}} = 1,07$  – оцінений параметр функції розподілу ймовірності виникнення землетрусу в районі Японських островів залежно від рівня сейсмічної активності Земної кулі;  $N_{\Sigma}$  – поточна сумарна кількість землетрусів магнітудою  $\geq 5$ , що виникли на Земній кулі.

Результати моделювання ймовірності виникнення землетрусу на території Азербайджану залежно від поточного рівня сейсмічної активності Земної кулі можливо навести, як:

залежно від рівня її сейсмічної активності наведені графічно на рис. 5.

Адекватність наведених на рис. 5 характеристик змін функцій розподілу ймовірностей виникнення землетрусів магнітудою  $\geq 5$  на окремих сейсмічно активних територіях Земної кулі залежно від рівня її сейсмічної активності залежить від результатів оцінки параметрів  $\hat{\alpha}$ . Точність оцінки параметрів  $\hat{\alpha}$  своєю чергою підтверджується розміром вибірки щодо кількості виникнення землетрусів на окремій сейсмічно активній території Земної кулі.

Так, під час здійснення аналізу сейсмічної активності в районі Японських островів розмір вибірки становив близько 120 випадків землетрусів магнітудою  $\geq 5$ . Розмір вибірки під час аналізування сейсмічної активності території Азербайджану становив близько 20 випадків землетрусів, а сейсмічної

активності гір Вранча – менше 10. Водночас розмір вибірки щодо загальної кількості землетрусів магнітудою  $\geq 5$  на Земній кулі за період 2009–2021 рр. становить понад 5 000 спостережень. Надалі збільшення терміну моніторингу рівня сейсмічної активності Земної кулі та окремих сейсмічно активних її територій

дасть змогу збільшити розмір вибірки, а також скорегувати параметри  $\alpha$  і  $\theta$ , наведені як вирази (7)–(8) математичних моделей оцінки ймовірностей виникнення землетрусів на окремих сейсмічно активних територіях Земної кулі залежно від рівня її сейсмічної активності.

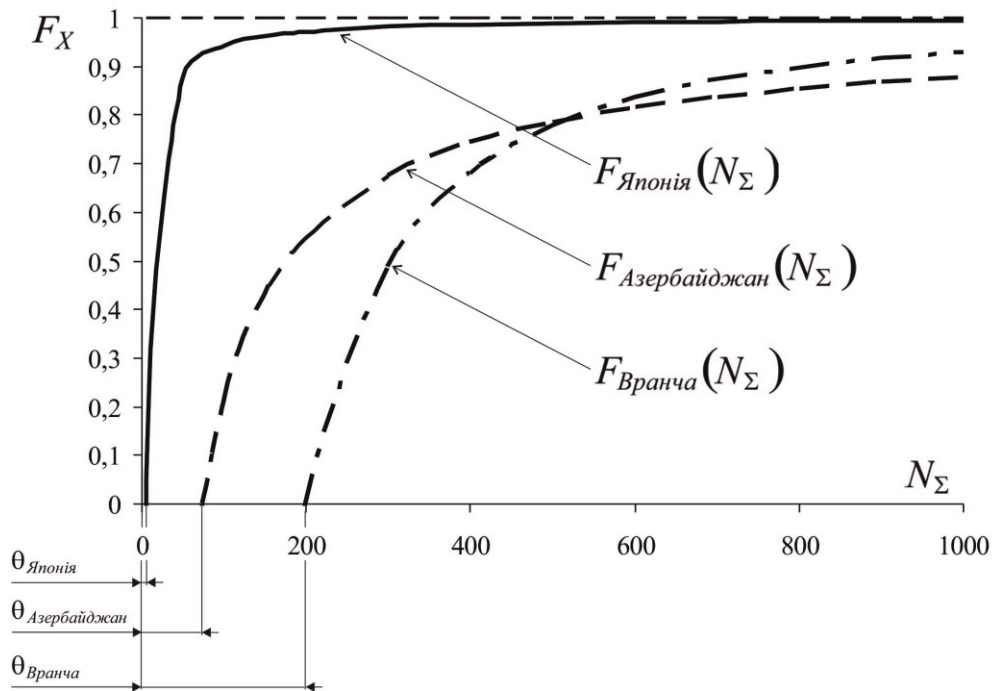


Рисунок 5 – Функції розподілу ймовірностей виникнення землетрусів на окремих сейсмічно активних територіях Земної кулі залежно від рівня її сейсмічної активності

Результати моделювання ймовірностей виникнення землетрусів на окремих сейсмічно активних територіях Земної кулі залежно від рівня сейсмічної активності Земної кулі лягли в основу удосконалення процедури підтримання ухвалення антикризових рішень на виконання структурними підрозділами системи цивільного захисту задач за призначенням щодо мінімізації наслідків геофізичних надзвичайних ситуацій.

Інформаційно-технічна реалізація результатів моделювання ймовірностей виникнення землетрусів на окремих сейсмічно активних територіях Земної кулі залежно від рівня її сейсмічної активності в інтересах удосконалення процедури підтримання ухвалення антикризових

рішень на виконання структурними підрозділами системи цивільного захисту задач за призначенням щодо мінімізації наслідків геофізичних НС передбачає відповідно до рис. 6 комплексне виконання в системі єдиного часу таких п'яти функцій.

1. Безперервний глобальний моніторинг рівня сейсмічної активності Земної кулі. Інформація від Глобальної системи сейсмічного моніторингу у реальному масштабі часу щодо загальної кількості землетрусів ( $N_{\Sigma}(t)$ ) та значення градієнту зміни цього параметра в часі ( $\frac{dN_{\Sigma}(t)}{dt}$ ) надходить до підсистеми підтримання ухвалення антикризових рішень ситуаційного центру.

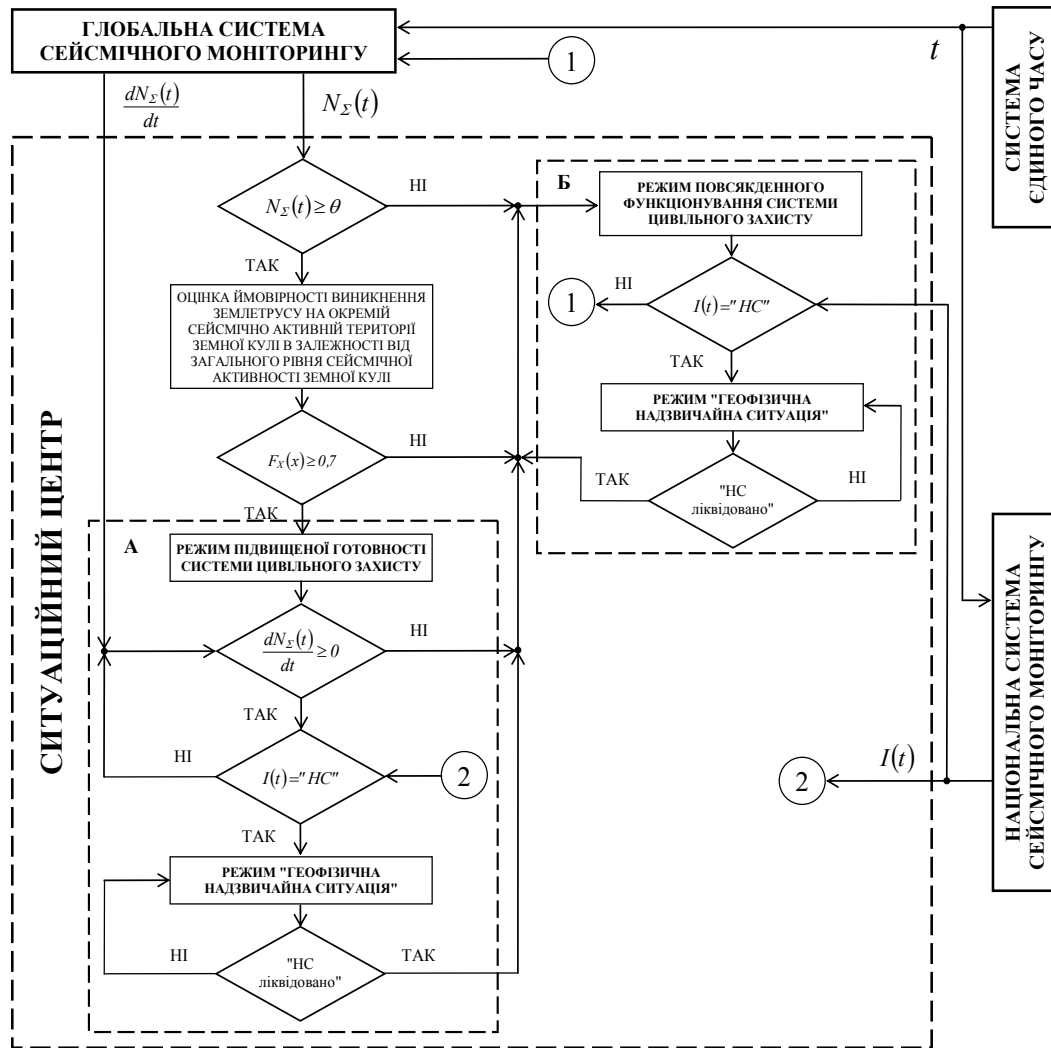


Рисунок 6 – Процедура підтримання ухвалення антикризових рішень на виконання структурними підрозділами системи цивільного захисту задач за призначенням щодо мінімізації наслідків геофізичних надзвичайних ситуацій

2. Безперервний моніторинг сейсмічної активності окремої території Земної кулі. Інформація про виникнення землетрусу ( $I(t)$ ) залежно від окремої території, що контролюється, у реальному масштабі часу надходить до підсистеми підтримання ухвалення антикризових рішень ситуаційного центру від Національної системи сейсмічного моніторингу, яка реалізована Національною системою сейсмічного моніторингу Головного центру спеціального контролю Державного космічного агентства України, Республіканським центром сейсмологічної служби при Національній академії наук Азербайджану тощо.

3. Оцінка (за результатами моніторингових спостережень) ймовірностей виникнення землетрусів на окремих сейсмічно активних територіях Земної кулі залежно від рівня її сейсмічної активності. Реалізація підсистемою підтримання ухвалення антикризових рішень ситуаційного центру цієї процедури складається з таких етапів:

– встановлення факту перевищення загальної кількості землетрусів ( $N_{\Sigma}(t)$ ), значення порогу  $\theta$ , що має характеристичне значення для кожної окремої сейсмічно активної території Земної кулі (див. рис. 5);

– оцінка у реальному масштабі часу ймовірності виникнення землетрусу на



окремій сейсмічно активній території Земної кулі залежно від рівня її сейсмічної активності. Особливості реалізації цієї процедури наведено на рис. 7;

– встановлення факту перевищення ймовірності виникнення землетрусу на окремій сейсмічно активній території Земної кулі щодо рівня порогу. Автори запропонували значення цього порогу

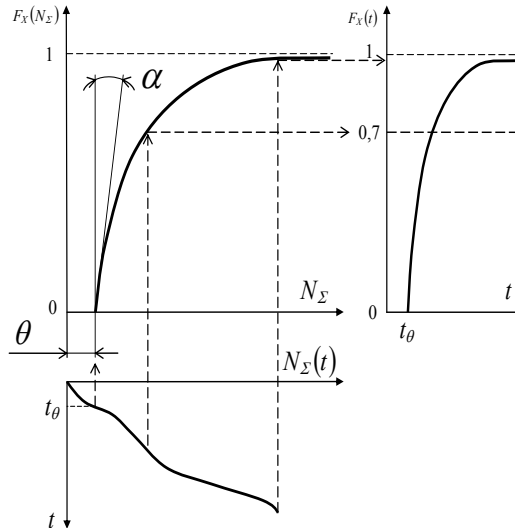


Рисунок 7 – Процедура оцінки ймовірності виникнення землетрусу на окремій сейсмічно активній території Земної кулі залежно від зміни в часі рівня її сейсмічної активності

4. Реалізація на окремій сейсмічно активній території Земної кулі (за результатами оцінки ймовірності виникнення на цій території землетрусу) режиму підвищеної готовності системи цивільного захисту. У разі встановлення цього режиму:

– здійснюється оповіщення органів влади, силових структур, комунальних та інших служб, а також населення про загрозу виникнення геофізичної НС та інформування його про дії у можливій зоні геофізичної НС;

– посилюється спостереження та контроль за сейсмічною та гідрометеорологічною обстановками, ситуацією на потенційно небезпечних об'єктах, на території об'єктів підвищеної небезпеки та/або за їх межами, на території, на якій є загроза виникнення геологічних, гідрогеологічних явищ і процесів, а також здійснюється постійна оцінка можливості виникнення геофізичної НС та її масштабів;

згідно з рис. 6 на рівні  $F_x(x) \geq 0,7$ , але воно може змінюватись залежно від вибору окремої сейсмічно активної території Земної кулі, де відповідний рівень безпеки життєдіяльності забезпечує наведена на рис. 1 геоінформаційна система безпеки від геофізичних НС, та є предметом окремих наукових досліджень.

– уточнюються плани реагування на геофізичну НС;

– уточнюються і здійснюються заходи щодо захисту населення та територій від можливої геофізичної НС;

– приводяться у повну готовність наявні сили та засоби.

Термін встановлення режиму підвищеної готовності для системи цивільного захисту на окремій сейсмічно активній території Земної кулі визначається такими факторами:

– виникнення землетрусу ( $I(t) = "НС"$ );

– градієнт зміни загальної кількості землетрусів на Земній кулі у часі стає

$$\frac{dN_z(t)}{dt} < 0.$$

5. Реалізація на окремій сейсмічно активній території Земної кулі (за результатами безперервного моніторингу її сейсмічної активності) режиму «Геофізична надзвичайна ситуація». У разі виникнення геофізичної НС:

– здійснюється оповіщення органів влади, силових структур, комунальних та інших служб, а також населення про землетрус та інформування його про дії в умовах такої ситуації;

– призначається керівник робіт із ліквідації геофізичної НС та утворюється у разі потреби спеціальна комісія з ліквідації наслідків землетрусу;

– визначається зона враження від геофізичної НС;

– здійснюється постійне прогнозування зони можливого поширення наслідків землетрусу;

– організуються роботи з локалізації й ліквідації наслідків землетрусу, залучаються для цього необхідні сили та засоби (розвідка; вилучення людей з-під завалів, а також порятунок людей з напівзруйнованих і палаючих будівель; локалізація та ліквідація аварій у комунальних та енергетичних мережах; обвалення або зміцнення нестійких конструкцій будівель і споруд тощо);

– організуються та здійснюються заходи щодо життєзабезпечення постраждалого населення (обладнуються пункти харчування та водопостачання; організується комендантська служба тощо);

– організуються та здійснюються евакуаційні заходи (обладнуються пункти збору постраждалих; обладнуються медичні пункти тощо);

– здійснюється безперервний контроль за обстановкою на потенційно небезпечних об'єктах, об'єктах підвищеної небезпеки, об'єктах радіаційної, хімічної та біологічної небезпеки і прилеглих до них територіях;

– організується безперервне у реальному масштабі часу інформування органів влади, органів управління силових структур, органів управління комунальних та інших служб і населення про обстановку в зоні ураження від землетрусу, а також про можливий каскадний розвиток НС різного походження від землетрусу, поширення їх наслідків і заходи, що здійснюються для їх локалізації та ліквідації.

Особливістю функціонування наведеної на рис. 6 схеми щодо реалізації процедури підтримання ухвалення антикризових рішень на виконання структурними підрозділами системи цивільного захисту задач за призначенням, які спрямовані на мінімізацію наслідків геофізичних НС, є блоки А і Б.

Блок А функціонує в умовах, коли спостерігається збільшення сейсмічної активності Земної кулі, а відповідно збільшення ймовірності виникнення землетрусу на окремій сейсмічно активній території Земної кулі ( $F_x(x) \geq 0,7$ ) та перехід системи цивільного захисту в режим підвищеної готовності.

Завершення роботи блоку А зумовлено такими умовами:

а) завершення процесу ліквідації наслідків землетрусу;

б) спостерігається стабільне зменшення загальної кількості землетрусів на Земній кулі ( $\frac{dN_\Sigma(t)}{dt} < 0$ ).

У цих випадках відбувається перехід до блоку Б, де спостерігається перехід системи цивільного захисту до режиму повсякденного функціонування.

Блок Б функціонує в умовах виникнення землетрусу у разі повсякденного функціонування системи цивільного захисту до завершення процесу ліквідації наслідків землетрусу.

**Висновки та напрями подальших досліджень.** 1. Розроблено ймовірнісну математичну модель оцінки можливості виникнення землетрусів магнітудою  $\geq 5$  на окремій сейсмічно активній території Земної кулі залежно від рівня її сейсмічної активності. Розроблена модель базується на уявленнях про динаміку фізичних процесів, які відбуваються в системі нелінійних енергетичних взаємодій Сонце – Земля – Місяць та впливають на рівень сейсмічної активності окремої сейсмічно активної території Земної кулі. Як вхідні дані щодо визначеності параметрів розподілу Парето використані результати спостережень Головного центру спеціального контролю Державного космічного агентства України

за рівнем сейсмічної активності Земної кулі за період 2009–2021 рр. За результатами моделювання отримані аналітичні вирази функцій розподілу ймовірностей виникнення землетрусів у районі Японських островів (територія з відносно високим ступенем сейсмічної активності), на території Азербайджану (територія з відносно середнім ступенем сейсмічної активності) та в районі гір Вранча (територія Румунії з відносно низьким ступенем сейсмічної активності, але ця територія становить сейсмічну небезпеку для території України) залежно від рівня сейсмічної активності Земної кулі.

2. Відповідно до розробленої ймовірнісної математичної моделі оцінки можливості виникнення землетрусів магнітудою  $\geq 5$  на окремій сейсмічно активній території Земної кулі залежно від рівня її сейсмічної активності удосконалено процедуру підтримання ухвалення антикризових рішень (особливістю реалізації якої є створення ситуаційних центрів) на виконання структурними підрозділами системи цивільного захисту задач за призначенням, які спрямовані на

мінімізацію наслідків геофізичних надзвичайних ситуацій. Інформаційно-технічна реалізація розробленої математичної моделі в інтересах удосконалення процедури підтримання ухвалення антикризових рішень передбачає комплексне виконання в системі єдиного часу таких п'яти функцій: 1) безперервний глобальний моніторинг рівня сейсмічної активності Земної кулі; 2) безперервний моніторинг сейсмічної активності окремої території Земної кулі; 3) оцінка (за результатами моніторингових спостережень) ймовірностей виникнення землетрусів на окремих сейсмічно активних територіях Земної кулі залежно від рівня її сейсмічної активності; 4) реалізація на окремій сейсмічно активній території Земної кулі (за результатами оцінки ймовірності виникнення на цій території землетрусу) режиму підвищеної готовності системи цивільного захисту; 5) реалізація на окремій сейсмічно активній території Земної кулі (за результатами безперервного моніторингу її сейсмічної активності) режиму «Геофізична надзвичайна ситуація».

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Десять найпотужніших землетрусів XX і XXI століть. *Надзвичайні новини* : вебсайт. URL : [https://nnovosti.info/articles/desjat\\_najpotuzhnishih\\_zemletrusiv\\_xx\\_i\\_xxi\\_stolit-36.html](https://nnovosti.info/articles/desjat_najpotuzhnishih_zemletrusiv_xx_i_xxi_stolit-36.html) (дата звернення : 01.10.2022).
- Найпотужніші землетрусу XXI століття. *Geograf* : вебсайт. URL : <http://www.geograf.com.ua/worldnews/1270-najpotuzhnishi-zemletrusu-xxi-stolitnya> (дата звернення : 01.10.2022).
- 7 найбільш руйнівних землетрусів 21-го століття. *MAPME CLUB* : вебсайт. URL : <http://mapme.club/poradi/5097-7-najbilsh-rujivnix-zemletrusiv-21-go-stolitnya.html> (дата звернення : 01.10.2022).
- Черногор Л. Ф. Физика и экология катастроф. Харьков: Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, 2012. 556 с.
- Chernogor L. F. Geomagnetic Disturbances Accompanying the Great Japanese Earthquake of March 11, 2011. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2019. Vol. 59 № 1 P. 62–75.
- Chernogor L. F. Possible Generation of Quasi-Periodic Magnetic Precursors of Earthquakes. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2019. Vol. 59. № 3. P. 374–382.
- Андронов В. А., Дівізінюк М. М., Калугін В. Д., Тютюник В. В. Науково-конструкторські основи створення комплексної системи моніторингу надзвичайних ситуацій в Україні : монографія. Харків : Національний університет цивільного захисту України, 2016. 319 с.
- Тютюник В. В., Черногор Л. Ф., Калугін В. Д., Агазаде Т. Х. Развитие основ геоинформационных систем мониторинга чрезвычайных ситуаций тектонического происхождения. *Прикладна радіоелектроніка*. 2019. Т. 18. Вип. 1, 2. С. 52–65.
- Тютюник В. В., Калугін В. Д., Писклакова О. О. Основоположні принципи створення у Єдиній державній системі цивільного захисту інформаційно-аналітичної підсистеми управління процесами попередження й локалізації наслідків надзвичайних ситуацій. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2018. Вип. 4 (50). С. 168–177.
- Тютюник В. В., Калугін В. Д., Писклакова О. О. Управлінські основи створення у Єдиній державній системі цивільного захисту інформаційно-аналітичної підсистеми управління процесами попередження й локалізації наслідків надзвичайних ситуацій. *Вісник національного університету цивільного захисту України. Серія «Державне управління»*. Харків: Національний університет цивільного захисту України. 2020. Вип. 1 (12). С. 546–571.
- Тютюник В. В., Черногор Л. Ф., Калугін В. Д., Агазаде Т. Х. Інформаційно-технічний метод моніторингу та прогнозування рівня сейсмічної безпеки локальної території Земної кулі. *Системи обробки інформації*. 2020. Вип. 2 (161). С. 99–113.
- Глобальна Мережа Прогнозування Землетрусів : офіційний сайт. URL : <http://seismonet.org/index.htm> (дата звернення : 01.10.2022).

13. Міжнародний консорціум сейсмологічних інститутів (IRIS) : офіційний сайт. URL : <https://www.iris.edu/hq/> (дата звернення : 01.10.2022).
14. US Geological Survey, National Earthquake Information Center. : website. URL : <http://www.earthquake.usgs.gov> (дата звернення : 11.10.2022).
15. Національний центр даних США (USNDC, Флорида, США) : офіційний сайт. URL : <http://www.usndcorps.org> (дата звернення : 11.10.2022).
16. Європейський середземноморський сейсмологічний центр. (EMSC, Париж, Франція) : офіційний сайт. URL : <http://www.kndc.kz/> (дата звернення : 11.10.2022).
17. Міжнародний сейсмологічний центр (ISC, Англія) : офіційний сайт. URL : <http://www.isc.ac.uk/> (дата звернення : 11.10.2022).
18. Центр вивчення Землі Німеччини (GFZ, Потсдам, Німеччина) : офіційний сайт. URL : <https://www.gfz-potsdam.de/> (дата звернення : 11.10.2022).
19. Норвезький сейсмологічний центр (NORSAR) : офіційний сайт. URL : <https://www.norsar.no/> (дата звернення : 11.10.2022).
20. Natal'in A. The Tectonic Evolution of Asia. *Cambridge University press*. 2001. p.486–638.
21. В СНГ создадут межгосударственную систему космического мониторинга ЧС. *ИТАР-ТАСС* : вебсайт. URL : <http://itar-tass.com/nauka/1529312> (дата звернення : 21.10.2022).
22. Казахстанський національний центр даних : офіційний сайт. URL : <http://www.kndc.kz/> (дата звернення : 21.10.2022).
23. Республіканський Центр Сейсмологічної Служби при Національній Академії Наук Азербайджану : офіційний сайт. URL : <http://www.seismology.az/> (дата звернення : 21.10.2022).
24. Головний центр спеціального контролю Національного Космічного агентства України : вебсайт. URL : [http://www.nkau.gov.ua/nsau/catalogNEW.nsf/0/62c5d33f313fc56bc2256f69\\_0055f574!OpenDocument&Lang=U&Click=](http://www.nkau.gov.ua/nsau/catalogNEW.nsf/0/62c5d33f313fc56bc2256f69_0055f574!OpenDocument&Lang=U&Click=) (дата звернення : 21.10.2022).
25. Кодекс цивільного захисту України від 2.10.2012 р. № 5403-VI. *Голос України*. 2012. Листопад (№ 220(5470)). С. 4–20.
26. Міністерство з надзвичайних ситуацій Азербайджанської республіки : офіційний сайт. URL : <https://www.fhn.gov.az/index.php?eng> (дата звернення : 21.10.2022).
27. Морозов А. А., Яценко В. А. Ситуационные центры. Информационные технологии будущего : новая информационная технология : монография. К. : Интертехнодрок, 2008. 332 с.
28. Гуфельд И. Л. Сейсмический процесс. Физико-химические аспекты. М. : ЦНИИМаш, 2007. 160 с.
29. Березняков А. І., Немець К. А. Фізика Землі. Харків : Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, 2010. 268 с.
30. Пупков К. А., Као Динь Чонг. Применение нейросетевых технологий в задачах прогнозирования землетрясений (на примере северо-западного района Вьетнама). *Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение»*. 2012. № 2. С. 70–78.
31. Rogozhin E. A., Rodina S. N. Paleoseismic studies and the long-term seismic regime in the North of Sakhalin Island. *Seismic Instruments*. 2012. № 48 (4). P. 333–341.
32. Родкин М. В., Шатахян А. Р. Статистический анализ данных по крупным и суперкрупным месторождениям : эмпирические закономерности и интерпретация. *Геоинформатика*. 2013. № 4. С. 25–32.
33. Rhodes C. J., Anderson R. M. Power laws governing epidemics in isolated populations. *Nature*. 1996. V. 381. P. 600–602.
34. Bak P. How nature works : the science of self-organized criticality. Springer-Verlag New York, Inc. 1996. 205 p.
35. Turcotte D. Fractals and Chaos in Geology and Geophysics. Cambridge Univ. Press. 1997. 398 p.
36. Яковлева И. А., Панина Е. А., Малезик А. В. Применение распределения Парето в задачах оценки вероятности возникновения аварий на химических предприятиях. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2007. Вип. 5. С. 216–221.
37. Rodkin M.V., Pisarenko V. F., Ngo Thi Lu, Rukavishnikova T. A. On potential representations of the distribution law of rare strongest earthquakes. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2014. № 5(4). P. 893–904.
38. Тютюник В. В., Черногор Л. Ф., Калугин В. Д., Агазаде Т. Х. Оценка влияния энергетических эффектов в системе Солнце–Земля–Луна на уровень сейсмической активности территории земного шара. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2017. Вип.6 (46). С. 238–246.
39. Тютюник В. В., Черногор Л. Ф., Калугин В. Д., Агазаде Т. Х. Оценка динамических и энергетических эффектов на планете Земля и влияние их на соотношение между уровнями сейсмической активности полушарий Земного шара. *Науковий вісник : Цивільний захист та пожежна безпека*. 2017. № 2(4). С. 101–117.
40. Тютюник В. В., Черногор Л. Ф., Калугин В. Д., Агазаде Т. Х. Оценка влияния вариаций скорости осевого вращения Земли на уровень сейсмической активности локальных территорий. *GEOINFORMATIKA*. 2018. №3 (67). С. 36–48.
41. Vadym Tiutiunyk, Vladimir Kalugin, Olha Pysklakova, Olexandr Yaschenko, Tural Agazade. Hierarchical clustering of seismic activity local territories. *Globe / EUREKA : Physics and Engineering*. 2019. №4. P. 41–53.

## REFERENCES

1. Desiat naipotuzhnishykh zemletrusiv XX i XXI stolit [Ten most powerful earthquakes of the 20th and 21st centuries]. *Nadzvychni novyny: vebseit*. Retrieved from [https://nnovosti.info/articles/desjat\\_najpotuzhnishih\\_zemletrusiv\\_xx\\_i\\_xxi\\_stolit-36.html](https://nnovosti.info/articles/desjat_najpotuzhnishih_zemletrusiv_xx_i_xxi_stolit-36.html) [in Ukrainian].
2. Naipotuzhnishi zemletrusu XXI stolittia [The most powerful earthquakes of the XXI century]. *Geograf: vebseit*. Retrieved from <http://www.geograf.com.ua/wor/ldnews/1270-najpotuzhnishi-zemletrusu-xxi-stolittia> [in Ukrainian].
3. 7 najbilsh rujniykh zemletrusiv 21-gho stolittja [7 most destructive earthquakes of the 21st century]. *MAPME CLUB: vebseit*. Retrieved from <http://mapme.club/poradi/5097-7-najbilsh-rujniykh-zemletrusiv-21-go-stolittia.html> [in Ukrainian].
4. Chernogor, L. F. (2012). *Fizika i ekologiya katastrof* [Fizyka u ekolohiya katastrof]. Khar'kov: Khar'kovskiy natsional'nyy universitet imeni V.N. Karazina [in English].
5. Chernogor, L. F. (2019). Geomagnetic Disturbances Accompanying the Great Japanese Earthquake of March 11, 2011. *Geomagnetism and Aeronomy*. 59 (1), 62–75. [in English].
6. Chernogor, L. F. (2019). Possible Generation of Quasi-Periodic Magnetic Precursors of Earthquakes. *Geomagnetism and Aeronomy*, 59 (3), 374–382. [in English].

7. Andronov, V. A., Divizinjuk, M. M., Kalugin, V. D., Tiutiunyk, V. V. (2016). Naukovo-konstruktorsjki osnovy stvorennja kompleksnoji systemy monitorynghu nadzvyčajnykh situacij v Ukraini [Scientific and design foundations of the creation of a comprehensive emergency monitoring system in Ukraine]. Kharkiv: Nacionalnyj universytet cyviljnogo zakhystu Ukrainy [in Ukrainian].
8. Tiutiunyk, V. V., Chernogor, L. F., Kalugin, V. D., Agazade, T. Kh. (2019). Razvitie osnov geoinformatsionnykh sistem monitoringa chrezvyčajnykh situatsiy tekto-nicheskogo proiskhozhdeniya [Development of the basics of geoinformation systems for monitoring emergency situations of tectonic origin]. *Prikladna radioelektronika*, 18 (1,2), 52–65. [in Ukrainian].
9. Tiutiunyk, V. V., Kalugin, V. D., Pysklakova, O. O. (2018). Osnovopolozhni pryncypy stvorennja u Jedynij derzhavnij systemi cyviljnogo zakhystu informacijno-analitychnoji pidsystemy upravlinnja procesamy poperedzhennja j lokalizaciji naslidkiv nadzvyčajnykh situacij [The fundamental principles of the creation of an information and analytical subsystem in the Unified State Civil Protection System for managing the processes of prevention and localization of the consequences of emergency situations]. *Systemy upravlinnja, navighaciji ta зв'язku*, 4 (50), 168–177. [in Ukrainian].
10. Tiutiunyk, V. V., Kalugin, V. D., Pysklakova, O. O. (2020). Upravlinsjki osnovy stvorennja u Jedynij derzhavnij systemi cyviljnogo zakhystu informacijno-analitychnoji pidsystemy upravlinnja procesamy poperedzhennja j lokalizaciji naslidkiv nadzvyčajnykh situacij [Administrative foundations of the creation of an information and analytical subsystem of the management of the processes of prevention and localization of the consequences of emergency situations in the Unified State Civil Protection System]. *Visnyk nacionaljnogo universytetu cyviljnogo zakhystu Ukrainy. Serija «Derzhavne upravlinnja»*, 1 (12), 546–571. [in Ukrainian].
11. Tiutiunyk, V. V., Chernogor, L. F., Kalugin, V. D., Agazade, T. Kh. (2020). Informacijno-tehnychnyj metod monitorynghu ta prognozuvannja rivnja sejsmichnoji nebezpeky lokalnoji terytoriji Zemnoji kuli. *Systemy obrobky informaciji*, 2 (161), 99–113. [in Ukrainian].
12. Oficijnyj sajт Ghlobalnoji Merezhi Prognozuvannja Zemletrusiv [Global Earthquake Prediction Network]. Retrieved from <http://seismonet.org/index.htm> [in Ukrainian].
13. Oficijnyj sajт Mizhnarodnogo konsorciumu sejsmologichnykh instytutiv (IRIS) [International Consortium of Seismological Institutes]. Retrieved from <https://www.iris.edu/hq/> [in Ukrainian].
14. US Geological Survey, National Earthquake Information Center. Retrieved from <http://www.earthquake.usgs.gov> [in English].
15. Oficijnyj sajт Nacionaljnogo centru danykh SSHa (USNDC, Floryda, SSHa) [US National Data Center (USNDC, Florida, USA)]. Retrieved from [www.usndcorps.org](http://www.usndcorps.org) [in Ukrainian].
16. Oficijnyj sajт Jevropejskogo seredzennomorskogho sejsmologichnogho centru (EMSC, Paryzh, Francija) [European Mediterranean Seismological Center]. Retrieved from <http://www.kndc.kz/> [in Ukrainian].
17. Oficijnyj sajт Mizhnarodnogo sejsmologichnogho centru (ISC, Anghlija) [International Seismological Center]. Retrieved from <http://www.isc.ac.uk/> [in Ukrainian].
18. Oficijnyj sajт Centru vyvchennja Zemli Nimechchyny (GFZ, Potsdam, Nimechchyna) [Center for the Study of the Land of Germany]. Retrieved from <https://www.gfz-potsdam.de/> [in Ukrainian].
19. Oficijnyj sajт Norvezjkogho sejsmologichnogho centru (NORSAR) [Norwegian Seismological Center]. Retrieved from <https://www.norsar.no/> [in Ukrainian].
20. Natal'in, A. (2001). The Tectonic Evolution of Asia. Cambridge University press, 486-638. [in English].
21. V SNG sozdatud mezhgosudarstvennyu systemu kosmicheskogo moni-toringa ChS [Norwegian Seismological Center]. Retrieved from <http://itar-tass.com/nauka/1529312> [in Russian].
22. Oficijnyj sajт Kazakhstanskogho nacionaljnogo centru danykh [Kazakhstan National Data Center]. Retrieved from <http://www.kndc.kz/> [in Ukrainian].
23. Oficijnyj sajт Respublikanskogho Centru Sejsmologichnoji Sluzhby pry Nacionalnij Akademiji Nauk Azerbajdzhanu [Republican Center of Seismological Service at the National Academy of Sciences of Azerbaijan]. Retrieved from <http://www.seismology.az/> [in Ukrainian].
24. Internet-sajт Gholovnogho centru specialjnogo kontrolju Nacionaljnogo Kosmichnogho aghentstva Ukrainy [The main center of special control of the National Space Agency of Ukraine]. Retrieved from <http://www.nkau.gov.ua/nsau/catalogNEW.nsf/0/62c5d33f313fc56bc2256f690055f574!OpenDocument&Lang=U&Click=> [in Ukrainian].
25. Code of Civil Protection of Ukraine from October 2 2012, № 5403-VI. (November (№ 220(5470))). *Gholos Ukrainy*, 4–20. [in Ukrainian].
26. Oficijnyj sajт Ministerstva z nadzvyčajnykh situacij Azerbajdzhanskoji respubliky [Ministry of Emergency Situations of the Republic of Azerbaijan]. Retrieved from <https://www.fhn.gov.az/index.php?eng> [in Ukrainian].
27. Morozov, A. A., Yashchenko, V. A. (2008). *Situational centers. Information Technology of the Future: New Information Technology* [Situation centers. Information technologies of the future: new information technology]. K. Intertekhnodruk [in Russian].
28. Gufel'd, I. L. (2007). Seysmicheskiy protsess. Fiziko-khimicheskie aspekty [Seismic process. Physical and chemical aspects]. M.O. TsNIIMash. [in Russian].
29. Bereznyakov, A. I., Nyemecz, K. A. (2010). *Fizyka Zemli* [Physics of the Earth]. Khar'kov, Khar'kovskiy natsional'nyy universitet im. V.N. Karazina [in Ukrainian].
30. Pupkov, K. A., Chong Kao Din. (2012). Primenenie neyrosetevykh tekhnologiy v zadachakh prognozirovaniya zemletryaseniy (na primere severo-zapadnogo rayona V'etnama) [Application of Neural Network Technologies in Problems of Earthquake Prediction]. *Vestnik MGTU imeni N.E. Baumana. Ser. «Pribo-rostroenie»*, 2, 70–78. [in Russian].
31. Rogozhin, E. A., Rodina, S. N. (2012). Paleoseismic studies and the long-term seismic regime in the North of Sakhalin Island. *Seismic Instruments*, 48 (4), 333–341. [in English].
32. Rodkin, M. V., Shatakhtsyan, A. R. (2013). Statistical analysis of catalogs of large and superlarge ore deposits: empirical regularities and their interpretation [Statistical analysis of data on large and super-large fields: empirical patterns and interpretation]. *Geoinformatika*, 4, 25–32. [in Russian].
33. Rhodes, C. J., Anderson, (1996). R.M. Power laws governing epidemics in isolated populations. *Nature*, 381, 600–602. [in English].
34. Bak, P. (1996). How nature works: the science of self-organized criticality. Springer-Verlad New York, Inc. [in English].
35. Turcotte, D. (1997). Fractals and Chaos in Geology and Geophysics. Cambridge Univ. Press. [in English].

36. Yakovleva, I. A., Panina, E. A., Malezhik, A. V. (2007). Primenenie raspredeleniya Pareto v zadachakh otsenki veroyatnosti vozniknoveniya avariy na khimicheskikh predpriyatiyakh [Application of the Pareto distribution in problems of assessing the probability of accidents at chemical plants]. *Problemy nadzvychajnykh situacij*, 5, 216–221. [in Russian].
37. Rodkin, M. V., Pisarenko, V. F., Ngo Thi Lu, Rukavishnikova, T. A. (2014). On potential representations of the distribution law of rare strongest earthquakes. *Geodynamics & Tectonophysics*, 5 (4), 893–904. [in English].
38. Tiutiunyk, V. V., Chernogor, L. F., Kalugin, V. D., Agazade, T. Kh. (2017). Otsenka vliyaniya energeticheskikh effektov v sisteme Solntse–Zemlya–Luna na uroven' seysmicheskoy aktivnosti territorii zemnogo shara [Estimation of the influence of energy effects in the Sun–Earth–Moon system on the level of seismic activity in the territory of the globe]. *Sistemy upravlinnja, navighaciji ta zv'jazku*, 6 (46), 238–246. [in Ukrainian].
39. Tiutiunyk, V. V., Chernogor, L. F., Kalugin, V. D., Agazade, T. Kh. (2017). Otsenka dinamicheskikh i energeticheskikh effektov na planete Zemlya i vliianie ikh na sootnoshenie mezhdru urovniami seysmicheskoy aktivnosti polusharij Zemnogo shara [Evaluation of dynamic and energy effects on the planet Earth and their influence on the ratio between the levels of seismic activity of the hemispheres of the globe]. *Naukovyj visnyk: Cylviljnyj zakhyst ta pozhezna bezpeka*, 2 (4), 101–117. [in Ukrainian].
40. Tiutiunyk, V. V., Chernogor, L. F., Kalugin, V. D., Agazade, T. Kh. (2018). Otsenka vliyaniya variatsiy skorosti oseвого vrashcheniya Zemli na uroven' seysmicheskoy aktivnosti lokal'nykh territorij [Estimation of the influence of variations in the speed of the axial rotation of the Earth on the level of seismic activity of local territories]. *GEOINFORMATIKA*, 3(67), 36–48. [in Russian].
41. Vadym Tiutiunyk, Vladimir Kalugin, Olha Pysklakova, Olexandr Yaschenko, Tural Agazade (2019). Hierarchical clustering of seismic activity local territories. *Globe / EUREKA: Physics and Engineering*, 4, 41–53. [in English].

## FEATURES OF SUPPORTING THE ADOPTION OF ANTI-CRISIS DECISIONS IN THE CONTEXT OF GEOPHYSICAL EMERGENCIES

T. Agazade<sup>1</sup>, V. Tiutiunyk<sup>2</sup>, L. Chernogor<sup>3</sup>, O. Tiutiunyk<sup>4</sup>

<sup>1</sup>State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Azerbaijan, Azerbaijan

<sup>2</sup>National University of Civil Defense of Ukraine, Ukraine

<sup>3</sup>V.N. Karazin Kharkiv National University, Ukraine

<sup>4</sup>Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Ukraine

**KEYWORDS:**      **ANNOTATION**

geophysical emergency, earthquake probability, anti-crisis decision support, situation center, civil protection system, performance of tasks as intended, minimization of consequences

A probabilistic mathematical model has been developed for assessing the possibility of earthquakes of magnitude  $\geq 5$  in a separate seismically active territory of the Earth, depending on the level of seismic activity of the Earth. The developed model is based on ideas about the dynamics of physical processes occurring in the system of nonlinear energy interactions Sun-Earth-Moon and affecting the level of seismic activity of a separate seismically active territory of the globe. As input data regarding the determination of the parameters of the Pareto distribution, the results of observations of the Main Center for Special Control of the State Space Agency of Ukraine over the level of seismic activity of the Earth in the period 2009–2021 were used. The simulation results formed the basis for improving the functioning of situational centers regarding the procedure for supporting the adoption of anti-crisis decisions for the implementation of the tasks by the structural units of the civil protection system, aimed at minimizing the consequences of geophysical emergencies. Information and technical implementation of the developed mathematical model in the interests of improving the procedure for supporting the adoption of anti-crisis decisions provides for the integrated implementation of the following five functions in the single time system: 1) continuous global monitoring of the level of seismic activity of the Earth; 2) continuous monitoring of seismic activity of a separate territory of the globe; 3) assessment, based on the results of monitoring observations, the probability of earthquakes in a separate seismically active territory of the globe, depending on the level of seismic activity of the globe; 4) implementation in a separate seismically active territory of the globe, based on the results of assessing the probability of an earthquake occurring in this territory, of a high alert mode of the civil protection system; 5) implementation on a separate seismically active territory of the Earth, based on the results of continuous monitoring of its seismic activity, of the «Geophysical emergency» mode.

УДК 614.839

## ВИЗНАЧЕННЯ НЕОБХІДНОЇ ПЛОЩІ ЛЕГКОСКИДНИХ КОНСТРУКЦІЙ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2.80-86>

Добряк Д. О.\*, ORCID iD 0000-0002-2360-3520  
 Ніжник В. В., ORCID iD 0000-0003-3370-9027  
 Нікулін О. Ф., ORCID iD 0000-0001-9126-0681  
 Кравченко Н. В., ORCID iD 0000-0001-9481-3034  
 Крикун О. М., ORCID iD 0000-0001-8132-9788

\*E-mail: vdb211@ukr.net

*Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Україна*

### ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 07.11.2022  
 Пройшла рецензування: 16.11.2022

### КЛЮЧОВІ СЛОВА:

вибух, легкоскидна конструкція для вибухопожежонебезпечних приміщень та будинків, надлишковий тиск вибуху, розрахункова площа легкоскидних конструкцій

### АНОТАЦІЯ

У статті наведено приклад визначення необхідної площі легкоскидних конструкцій (далі – ЛСК) для вибухонебезпечного приміщення. Зокрема, наведені приклади для визначення максимально нормальної швидкості поширення полум'я у суміші газів, ступеня стиснення продуктів горіння під час вибуху у замкнутому об'ємі з концентрацією горючої речовини, яка відповідає  $S_{нкмП}$ , ступінь стиснення продуктів горіння під час вибуху у замкнутому об'ємі з концентрацією горючої речовини, що відповідає  $V_{н.мах}$ , коефіцієнта ступеня заповнення об'єму приміщення пожежовибухонебезпечною сумішшю та її участі у вибуху, значення показника інтенсифікації горіння, коефіцієнта, що враховує ступінь заповнення об'єкта приміщення пожежовибухонебезпечною сумішшю, густини горючого середовища за певної концентрації горючої речовини. Встановлено алгоритм дії під час оцінювання необхідної площі ЛСК. Визначено необхідну площу ЛСК для складського приміщення розмірами 15 м x 10 м x 5 м, у якому зберігаються балони з пропан-бутаном за умови витоку газу в кількості 21,2 кг.

**Постановка проблеми.** Підходи щодо оцінювання необхідної площі ЛСК визначені в [1]. Зокрема, згідно із цим нормативним документом встановлені основні положення розрахунку параметрів ЛСК та показники пожежовибухонебезпечності деяких речовин і матеріалів. Під час використання [1] у проєктувальників виникає ряд питань, що зумовлює необхідність додаткових роз'яснень та розроблення прикладу розрахунку. Зокрема, виникають питання під час визначення таких розрахункових параметрів, як визначення максимально нормальної швидкості поширення полум'я у суміші газів, ступеня стиснення продуктів горіння під час вибуху в замкнутому об'ємі з концентрацією

горючої речовини, яка відповідає нижній концентраційній межі поширення полум'я тощо.

Відповідно до [2–3] приміщення категорій А та Б за вибухопожежною і пожежною небезпекою слід оснащувати зовнішніми ЛСК. Щоб реалізувати зазначену вимогу на етапі проєктування, проєктувальникам необхідно встановити мінімально необхідну площу ЛСК залежно від характеристик самого об'єкта та технологічного процесу, який в ньому відбувається, зокрема пожежовибухонебезпечності характеристик речовин і матеріалів. У документах [1–2] вказується, що необхідну площу ЛСК слід визначати розрахунком.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз ряду проектної, конструкторської документації та виконаних розрахунків на визначення необхідної площі ЛСК показав, що серед складних для розуміння розрахункових підходів [1] є визначення максимально нормальної швидкості поширення полум'я у суміші газів, ступеня стиснення продуктів горіння під час вибуху у замкнутому об'ємі з концентрацією горючої речовини, яка відповідає  $S_{нкмр}$ , ступеня стиснення продуктів горіння під час вибуху у замкнутому об'ємі з концентрацією горючої речовини, що відповідає  $V_{н,мак}$ , коефіцієнта ступеня заповнення об'єму приміщення пожежовибухонебезпечною сумішшю і її участі у вибуху, значення показника інтенсифікації горіння, коефіцієнта, що враховує ступінь заповнення об'єкта приміщення вибухопожежонебезпечною сумішшю, густини горючого середовища за певної концентрації горючої речовини тощо.

Аналіз аналогічних випадків, зокрема в частині реалізації вимог [4] показав, що ефективним рішенням є розроблення розрахункових прикладів для практичного їх використання проєктувальниками, наприклад [5–7].

У посібнику [5] розглянуті розрахункові методи визначення категорій приміщень і будинків виробничого та складського призначення, а також зовнішніх установок за вибухопожежною і пожежною небезпекою, в яких обертаються горючі гази, легкозаймисті та горючі рідини, горючий пил і тверді горючі матеріали та речовини. У роботі [6] наведено пояснення щодо застосування підходів під час визначення надлишкового тиску вибуху пилоповітряної суміші. Автори у роботі [7] визначили найбільший і найменший показники значущих факторів впливу на значення критичної поверхневої густини теплового потоку, а саме – швидкості вітру та заданої поверхневої щільності теплового потоку. Була створена математична модель, яка описує залежність впливу вітру на

критичну поверхневу щільність теплового потоку для гофрокартону.

**Мета дослідження** розробити типовий приклад визначення мінімально необхідної площі ЛСК для практичного використання проєктувальними організаціями.

**Методи дослідження.** У роботі для досягнення поставленої мети використовувалися метод аналітичних досліджень, розрахункова методика.

Методологію визначення необхідної площі ЛСК згідно із [1] можна описати таким алгоритмом:

- визначення необхідності встановлення ЛСК;
- визначення категорії приміщень, будинків за вибухопожежною та пожежною небезпекою;
- перевірка умов використання розрахункового методу;
- проведення розрахунку згідно із [1];
- перевірка умов безпеки через порівняння необхідної та фактичної площі ЛСК із урахуванням коефіцієнта безпеки.

**Виклад основного матеріалу.** Для визначення доцільності обладнання виробничого приміщення ЛСК необхідно визначити категорію приміщення за вибухопожежною та пожежною небезпекою згідно з [4].

У роботі розглянуто розрахунковий приклад оцінювання мінімально необхідної площі ЛСК для складського приміщення із балонами з пропан-бутаном.

Вихідними даними для розрахунку берем:

складське приміщення розмірами 5 м х 10 м х 5 м. У приміщенні зберігаються балони з пропаном-бутаном об'ємом 27 л, робочий тиск у балоні 1,6 МПа, маса зрідженого газу у балоні 21,2 кг. Зріджений газ у балоні – це газова суміш пропан-бутану у співвідношенні 40% : 60 % (об.). Температура у приміщенні 20 °С.

Прийняття розрахункової аварійної ситуації.

За вимогами [4] під час розрахунку значень критеріїв за вибухопожежною та пожежною небезпекою приміщень



потрібно вибрати найбільш несприятливий варіант аварії або період нормальної роботи апаратів і/або технологічного устаткування, за якого у вибуху бере участь найбільша кількість речовин, найнебезпечніших щодо наслідків такого вибуху. Відповідно для зазначеного приміщення як розрахунковий варіант аварії приймаємо ситуацію, коли внаслідок необережного поводження з балоном сталася його розгерметизація, тобто у повітря приміщення потрапило 21,2 кг газової суміші.

Реалізувавши методичні підходи [4], встановлено, що у складському приміщенні є горючий газ у балонах у такій кількості, що під час аварійної ситуації може утворитися газоповітряна вибухонебезпечна суміш, у разі займання якої розвинеться розрахунковий надлишковий тиск вибуху, який перевищує 5 кПа.

Приміщення складу для зберігання балонів із зрідженим газом пропан-бутаном належить до вибухонебезпечної категорії А. Це означає, що приміщення має бути оснащено ЛСК. Площу ЛСК для приміщення, яке за категорією належить до вибухопожежної категорії «А», можна визначити за підходами [2]. У цій роботі розглянуто випадок розрахунку площі ЛСК розрахунковим методом згідно із [1].

Визначення площі ЛСК.

Площа ЛСК за вимогами [1] визначається за формулою:

$$S_{\text{ЛСК}} = \frac{0,105 v_{\text{н.п.}} \alpha (\varepsilon_c - 1) \beta_\mu K_\phi \sqrt[3]{V_g^2 \rho_0}}{\sqrt{P_{\text{доп}}}} \quad (1)$$

де:  $v_{\text{н.п.}}$  – нормальна швидкість поширення полум'я;

$\alpha$  – показник інтенсифікації вибухового горіння;

$\varepsilon_c$  – розрахункова ступінь стиснення продуктів горіння під час вибуху в замкнутому просторі;

$\beta_\mu$  – коефіцієнт, який враховує ступінь заповнення об'єму приміщення пожежовибухонебезпечною сумішшю;

$K_\phi$  – коефіцієнт, що враховує вплив форми приміщення і ефект витікання

продуктів горіння пожежовибухонебезпечної суміші;

$V_g$  – вільний об'єм приміщення м<sup>3</sup>;

$\rho_0$  – розрахункова густина газу у приміщенні перед займанням, кг/м<sup>3</sup>;

$P_{\text{доп}}$  – допустимий тиск вибуху, кПа.

Обчислення  $S_{\text{ЛСК}}$  за формулою (1) можна проводити у випадках, якщо виконуються такі умови:

- якщо розрахункова видима швидкість поширення полум'я не перевищує 65 м/с;
- за відсутності детонаційних процесів;
- якщо у вибуху не бере участь пил неорганічних речовин і металів;
- лінійні розміри вибухонебезпечно приміщення по довжині, ширині та висоті не більше ніж у 10 разів відрізняються один від одного;
- прорізи в елементах (стіни, покриття) зовнішнього огороження вибухонебезпечно приміщення розміщуються достатньо рівномірно або поблизу можливого місця займання горючої суміші.

Розрахункову нормальну швидкість поширення полум'я  $v_{\text{н.п.}}$  для газоповітряних сумішей визначають за формулою:

$$v_{\text{н.п.}} = 0,55 \cdot v_{\text{н.макс.}} \quad (2)$$

де  $v_{\text{н.макс.}}$  – для газоповітряних сумішей береться рівною нормальній швидкості поширення полум'я, що визначають щодо горючої суміші стехіометричного складу за довідковими даними або згідно із даними, що наведені у додатку Б [1]. Враховуючи співвідношення пропан-бутану у суміші, максимальна нормальна швидкість поширення полум'я у суміші пропан-бутану з повітрям за даними [1] становить 0,438 м/с.

Відповідно розрахункова нормальна швидкість поширення полум'я  $v_{\text{н.п.}}$  у суміші пропан-бутану з повітрям становить 0,241 м/с.

Розрахунковий ступінь стиснення продуктів горіння під час вибуху у замкнутому об'ємі  $\varepsilon_c$  визначають за формулою:

$$\varepsilon_c = 0,5 \cdot (\varepsilon_{c.\text{НКМП}} + \varepsilon_{c.\text{max}}) \quad (3)$$

де  $\varepsilon_{c.\text{НКМП}}$  – ступінь стиснення продуктів горіння під час вибуху у замкнутому об'ємі з концентрацією горючої речовини, яка відповідає  $C_{\text{НКМП}}$ ;

$\varepsilon_{c.\text{max}}$  – ступінь стиснення продуктів горіння під час вибуху у замкнутому об'ємі з концентрацією горючої речовини, що відповідає  $V_{\text{н.мах}}$ .

$C_{\text{НКМП}}$  – масова концентрація пропан-бутану у повітрі, якій відповідає НКМП, г/м<sup>3</sup>. Ступінь стиснення продуктів горіння під час вибуху у замкнутому об'ємі з концентрацією пропан-бутану, яка відповідає  $C_{\text{НКМП}}$ , враховуючи співвідношення у суміші пропан-бутану, та за даними [1] становить 6,22.

$\varepsilon_{c.\text{max}}$  – ступінь стиснення продуктів горіння пропан-бутану під час вибуху в замкнутому об'ємі з концентрацією пропан-бутану, що відповідає максимальній нормальній швидкості поширення полум'я,  $V_{\text{н.мах}}$ , яка за даними [1] та враховуючи співвідношення у суміші пропан-бутану становить 9,64.

Розрахунковий ступінь стиснення продуктів горіння під час вибуху пропан-бутану у приміщенні  $\varepsilon_c$  визначається за формулою (3), що становить 7,93.

Коефіцієнт ступеня заповнення об'єму приміщення пожежовибухонебезпечною сумішшю і її участі у вибуху  $\mu_v$  визначають за формулою:

$$\mu_v = \frac{2000mZ}{V_B \cdot (C_{\text{НКМП}} + C_{\text{max}})}, \quad (4)$$

де  $m$  – маса горючого газу, що надходить у приміщення в аварійних ситуаціях, кг, визначають згідно з [4], в нашому випадку  $m=21,2$  кг;

$Z$  – коефіцієнт участі горючої речовини у вибуху, що визначають згідно із вимогами [4];

$C_{\text{НКМП}}$  – масова концентрація горючої речовини у горючому середовищі, якій відповідає НКМП, г/м<sup>3</sup>, враховуючи співвідношення у суміші пропан-бутану та

за даними додатку В [1]  $C_{\text{НКМП}}$  становить 37,64;

$C_{\text{max}}$  – масова концентрація горючої речовини у займистому середовищі, якій відповідає  $v_{\text{н.мах}}$ , г/м<sup>3</sup>, враховуючи співвідношення у суміші пропан-бутану та за даними додатка В [1]  $C_{\text{max}}$  становить 75,12.

Коефіцієнт ступеня заповнення об'єму приміщення пожежовибухонебезпечною сумішшю і її участі у вибуху  $\mu_v$  визначаємо за формулою (4), він становить 0,31.

Значення показника інтенсифікації вибухового горіння  $\alpha$  визначають за таблицею 1 [1] залежно від ступеня захаращеності приміщення будівельними конструкціями і обладнанням  $\theta_3$  та об'єму  $V$ , в якому відбувається горіння. Допускається брати значення  $\theta_3 > 15$  %. У приміщенні складу балонів з пропан-бутаном  $\theta_3 = 20$  %. Табличні дані використовують для розрахунку водневоповітряних сумішей, а також інших видів пожежовибухонебезпечних сумішей з  $v_{\text{н.п}} \leq 0,5$  м/с. За розрахунками  $v_{\text{н.п}} = 0,241$  м/с.

Значення  $V$  визначають з огляду на умови:

$$V = V_{\text{прим}} \text{ при } V_{\text{пол}} \geq V_{\text{прим}}, \quad (5)$$

$$V_{\text{пол}} = 6,53 \cdot \mu_v \cdot V_{\text{прим}}, \quad (6)$$

де  $V_{\text{пол}}$  – об'єм полум'я, м<sup>3</sup>.

Об'єм полум'я становить 1 518,2 м<sup>3</sup>.

Тобто умова, описана у формулі (5), виконується і об'єм  $V$ , в якому відбувається горіння, дорівнює об'єму приміщення та становить 750 м<sup>3</sup>.

Показник інтенсифікації вибухового горіння визначається лінійною інтерполяцією за табл. 1 [1] залежно від ступеня захаращеності приміщення будівельними конструкціями й обладнанням  $\theta_3$  та об'єму  $V$ , в якому відбувається горіння вибухонебезпечною суміші:

- для малогабаритних будівельних конструкцій та обладнання за  $\theta_3$ , що дорівнює 20%, – 8,9;

- для великогабаритних будівельних конструкцій та обладнання за  $\theta_3 = 20\%$   $\alpha$  дорівнює 5,44.

Для 60% великогабаритних і 40% малогабаритних будівельних конструкцій та обладнання  $\alpha$  дорівнює 6,82.

Допустимий тиск вибуху – це тиск, за якого дотримується безпека людей та зберігається цілісність несучих будівельних конструкцій вибухопожежонебезпечних приміщень і будинків.

У загальному випадку допустимий надлишковий тиск у приміщенні у разі горіння вибухонебезпечної суміші  $\Delta P_{доп}$  береться рівним 5 кПа. Для повільно палаючих середовищ (максимальна нормальна швидкість поширення полум'я  $U_{н.макс} \leq 0,15$  м/с)  $\Delta P_{доп}$  береться рівним 3 кПа. Для цього приміщення допускається брати  $P_{доп} = 5$  кПа.

Коефіцієнт, що враховує ступінь заповнення об'єму приміщення пожежовибухонебезпечною сумішшю,  $\beta_\mu$  визначають залежно від величини коефіцієнта  $\mu_v$  за формулами:

$$\beta_\mu = 0 \text{ – якщо } \mu_v \leq \mu_1 = \frac{0,01P_{доп}}{\varepsilon_c - 1} \quad (7)$$

$$\beta_\mu = 1 \text{ – якщо } \mu_v \geq \mu_2 = \frac{1,3}{\varepsilon_c} \quad (8)$$

$$\beta_\mu = \frac{\mu_v - \mu_1}{\mu_2 - \mu_1} \text{ якщо } \mu_1 < \mu_v < \mu_2 \quad (9)$$

$$\rho_0 = \frac{0,5367\mu_v^*(\rho_{НКМП} + \rho_{max})}{1 + 0,00367t_0} + (1 - \mu_v^*) \cdot \frac{1,294}{1 + 0,00367t_0}, \quad (11)$$

де:  $\rho_{НКМП}$  – густина горючого середовища за концентрації горючої речовини, що відповідає НКМП, кг/м<sup>3</sup>, визначають згідно із додатком Б [1]. Враховуючи співвідношення пропан-бутану, густина суміші пропан-бутану в повітрі за концентрації горючої речовини, що відповідає НКМП, становить 1,21 кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{max}$  – густина горючого середовища за концентрації горючої речовини, що

Визначаємо  $\mu_1$  за формулою (7):

$$\mu_1 = \frac{0,01 \cdot P_{доп}}{\varepsilon_c - 1} = 0,0072$$

Зважаючи, що  $\mu_v = 0,31$ , умова (7) не виконується.

Визначаємо  $\mu_2$  за формулою (8),  $\mu_2 = 0,164$ .

Зважаючи, що  $\mu_v = 0,31$ , умова (8) виконується. Тобто  $\beta_\mu = 1$ . Умова (9) не виконується.

Коефіцієнт  $K_\phi$ , що враховує вплив форми приміщення та ефект витікання продуктів горіння пожежовибухонебезпечної суміші, за  $\mu_v \geq \mu_2$ , визначають за формулою:

$$K_\phi = \frac{0,5 \cdot (b_p^2 + h_p^2)}{\sqrt[3]{V_{прим}^2}}, \text{ якщо } h_p \leq a_p, \quad (10)$$

де:  $a_p$  – довжина приміщення, м, за вихідними даними становить 12;

$b_p$  – ширина приміщення, м, за вихідними даними становить 6;

$h_p$  – висота приміщення, м за вихідними даними становить 3.

Коефіцієнт  $K_\phi$ , що враховує вплив форми приміщення та ефект витікання продуктів горіння пожежовибухонебезпечної суміші, якщо  $\mu_v \geq \mu_2$ , за формулою (10) становить  $K_\phi = 0,79$ .

Розрахункову густину газу в приміщенні перед займанням  $\rho_0$  визначено за формулою:

відповідає  $v_{н.макс}$ , кг/м<sup>3</sup>, визначають згідно з додатком Б [1]. Враховуючи співвідношення пропан-бутану, густина суміші пропан-бутану у повітрі за концентрації горючої речовини, що відповідає  $v_{н.макс}$ , становить 1,23 кг/м<sup>3</sup>;

$\mu_v^*$  – коефіцієнт ступеня заповнення об'єму приміщення пожежовибухонебезпечною сумішшю;

$t_0$  – максимальна температура повітря у приміщенні перед займанням, °С;

$$\mu_v^* = \mu_v/Z \quad (12)$$

Визначаємо  $\mu_v^*$  за формулою (12), що дорівнює 0,62.

Визначаємо розрахункову густину газу в приміщенні перед займанням  $\rho_0$  за формулою (12), що дорівнює 1,212 (кг/м<sup>3</sup>).

Площу ЛСК визначаємо за формулою (1), і вона становить 30,75 м<sup>2</sup>.

За вимогами [1] одну з вимог вибухопожежобезпеки приміщень та будинків можна записати як нерівності

$$K \cdot S_{\text{ЛСК}} \leq S_{\text{фЛСК}}, \quad (13)$$

де  $S_{\text{фЛСК}}$  – фактична площа ЛСК, м<sup>2</sup>;

$S_{\text{ЛСК}}$  – площа ЛСК, м<sup>2</sup>;

$K$  – коефіцієнт безпеки (береться рівним  $K=0,7$ ).

**Висновки та напрями подальших досліджень.** За результатами розгляду оцінки необхідної площі ЛСК встановлено алгоритм дій,

який включає: визначення доцільності встановлення ЛСК, з'ясування категорії приміщення за вибухопожежною та пожежною небезпекою, розрахунок необхідної площі ЛСК, перевірка умови безпеки.

1. Визначено, що необхідна площа ЛСК для складу балонів зі зрідженим пропан-бутаном розміром 15 м x 10 м x 5 м та за умови витоку газу в кількості 21,2 кг становить не менше ніж 30,75 м<sup>2</sup>.

2. У роботі наведено практичний приклад застосування стандартизованого методу оцінювання необхідної площі ЛСК, що стає передумовою для якісної реалізації розрахункового методу визначення мінімальної необхідної площі ЛСК проєктувальними організаціями у практичній діяльності.

3. У подальших дослідженнях доцільно апробувати реалізацію методу [1] із використанням сучасних програмних моделювальних комплексів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пожежна безпека методи визначення параметрів легкоскридних конструкцій для приміщень та будинків. Основні положення : ДСТУ 9176 : 2022 [Принятий 08.04.2022].
2. Производственные здания : СНиП 2.09.02. М. : ЦНИИПромзданий ГОССТРОЙ СССР, 1991. 17 с.
3. Котельні : ДБН В.2.5-77:2014 [Чинний з 2015-01-01]. Київ : Мінрегіон України, 2014. 65 с.
4. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою : ДСТУ Б В.1.1-36 : 2016 [Чинний з 2017-01-01]. Київ : Мінрегіон України, 2016. 31 с.
5. Посібник з практичного застосування ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою» : [Науково-виробниче видання]. Київ : ТОВ «Київська книжково-журнальна фабрика», 2018. 192 с.
6. Луценко Ю. В., Добряк Д. О., Кравченко Н. В. Особливості розрахунку надлишкового тиску вибуху пилоповітряних сумішей у виробничих приміщеннях. *Вчені записки Таврійського Національного університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки*. 2022. Т. 33 (72). № 4. С. 299–303.
7. Borysova A., Nizhnyk V., Ballo Ya, Krychenko O. Justification of reference table data of dependence of wind effect on critical surface density heat flux for corrugated cardboard. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering* (Vol. 1021, Issue : 119. January 2021) : International Scientific Conference on Energy Efficiency in Transport, EET. 18 November 2020. Kharkiv.

## REFERENCES

1. Pozhezhna bezpeka metody vyznachennia parametriv lehkoskydnykh konstruktсии dlia prymishchen ta budynkiv. Osnovni polozhennia [Fire safety methods of determining the parameters of easily removable structures for premises and buildings. Substantive provisions]. DSTU 9176: 2022 [In Ukrainian].
2. Proizvodstvennye zdaniya [Production buildings]. (1991). SNiP 2.09.02 M.: TsNIIpromzdaniy GOSSTROY SSSR [in Russian].
3. Kotelni [Boiler rooms]. (2014). DBN V.2.5-77:2014 from 1 January 2015. Kyiv: Minrehion Ukrainy [In Ukrainian].
4. Vyznachennia katehorii prymishchen, budynkiv ta zovnishnikh ustanovok za vybukhopozhezhnoiu ta pozhezhnoiu nebezpekoiu [Determination of categories of premises, buildings and external installations according to explosion and fire hazard]. (2016). DSTU B V.1.1-36: 2016 from 1 January 2017. Kyiv: Minrehion Ukrainy [In Ukrainian].
5. Posibnyk z praktychnoho zastosuvannia DSTU B V.1.1-36:2016 Vyznachennia katehorii prymishchen, budynkiv ta zovnishnikh ustanovok za vybukhopozhezhnoiu ta pozhezhnoiu nebezpekoiu [Manual on the practical application of DSTU B V.1.1-36:2016 "Definition of categories of premises, buildings and external installations according to explosion and fire hazard"]. (2018). Kyiv : TOV «Kyivska knozhkovozhurnalna fabryka» [In Ukrainian].
6. Lutsenko, Yu.V., Dobriak, D. O., Kravchenko, N. V. (2022). Osoblyvosti rozrakhunku nadlyshkovoho tysku vybukhu pylopovitrianykh sumishei u vyrobnychykh prymishchenniakh [Peculiarities of calculating the excess pressure of the explosion of dust-air mixtures in industrial premises.]. *Vcheni zapysky Tavriiskoho Natsionalnoho universytetu imeni V.I. Vernadskoho Seriya: Tekhnichni nauky*, 33 (72), 4, 299-303. [In Ukrainian].

7. Borysova A., Nizhnyk V., Ballo Ya, Krychenko O. (2020). Justification of reference table data of dependence of wind effect on critical surface density heat flux for corrugated cardboard. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering* (Vol. 1021, Issue : 119. January 2021) : International Scientific Conference on Energy Efficiency in Transport, EET. Kharkiv [in English].

## REGARDING THE DETERMINATION OF THE NECESSARY AREA OF EASY-DROPPED CONSTRUCTION

*D. Dobriak, V. Nizhnyk, O. Nikulin, N. Kravchenko, O. Krykun*

*Institute of Public Administration and Research in Civil Protection, Ukraine*

---

### KEYWORDS:

explosion, easy-dropped construction for explosion-hazardous premises and buildings, explosion pressure, estimated area of easy-dropped construction

### ANNOTATION

The article provides a practical example of determining the required area of easy-dropped construction (hereinafter – EDC) for an explosive room in accordance with the requirements [1]. In particular, examples are given for determining the maximum normal speed of flame propagation in a mixture of gases, the degree of compression of combustion products during an explosion in a closed volume with the concentration of a combustible substance that corresponds to the lower concentration limit of flame propagation, the degree of compression of combustion products during an explosion in a closed volume with a concentration of a combustible substance that corresponds to the maximum normal speed of flame propagation, the coefficient of the degree of filling the volume of the room with a fire-explosive mixture and its participation in the explosion, the value of the combustion intensification indicator, the coefficient that takes into account the degree of filling of the object of the room with a fire-explosive mixture, the density of the combustible medium at a certain concentration of the combustible substance. An action algorithm was established during the assessment of the required area of the EDC, which includes: determination of the need to install the EDC; determination of the category of premises, buildings according to explosion and fire hazard; verification of the conditions of use of the calculation method; calculation according to [1]; verification of safety conditions by comparing the required and actual area of the EDC, taking into account the safety factor. It was determined that the calculation of the EDC area can be carried out under the conditions that the speed of flame propagation does not exceed 65 m/s, there are no detonation processes, dust of inorganic substances and metals does not participate in the explosion, the linear dimensions of the explosive room in length, width and height are not more than 10 times different from each other, and the openings in the elements (walls, covering) of the outer enclosure of the explosive room are placed fairly evenly or near the possible ignition point of the combustible mixture. The considered method is used during the design and construction, reconstruction, restoration, capital repair of explosion-proof and fire-hazardous premises and buildings in terms of equipping them with EDC during testing, as well as during the development of regulatory and technical documentation for EDC. The required area of the EDC for a warehouse with dimensions of 15 m x 10 m x 5 m, in which cylinders with propane-butane are stored in the event of a gas leak in the amount of 21.2 kg, is determined.

УДК 614.839

## МОДЕЛЮВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНОГО ПРОГРІВУ ВОГНЕЗАХИЩЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОЛОН

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2.87-98>

Ковальов А. І.<sup>1\*</sup>, ORCID iD 0000-0002-6525-7558  
Пурденко Р. Р.<sup>2</sup>, ORCID iD 0000-0001-6467-4133  
Отрош Ю. А.<sup>1</sup>, ORCID iD 0000-0003-0698-2888  
Томенко В. І.<sup>3</sup>, ORCID iD 0000-0001-7139-9141  
Рашкевич Н. В.<sup>1</sup>, ORCID iD 0000-0001-5124-6068  
Юрченко С. П.<sup>4</sup>, ORCID iD 0000-0002-2775-238X  
\*E-mail: kovalev27051980@gmail.com

<sup>1</sup> Національний університет цивільного захисту України, Україна

<sup>2</sup> Приватне підприємство «ПроектБудСтар», Україна

<sup>3</sup> Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, Україна

<sup>4</sup> Черкаський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України, Україна

### ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 19.09.2022  
Пройшла рецензування: 11.11.2022

### КЛЮЧОВІ СЛОВА:

вогнестійкість, моделювання нестационарного прогріву, залізобетонна колона, вогнезахист, вогнезахисне покриття, ЛІРА-САПР

### АНОТАЦІЯ

Проведено аналіз результатів досліджень вогнестійкості залізобетонних конструкцій і встановлено, що сучасні підходи до оцінювання вогнестійкості не завжди дають змогу отримати оптимальні рішення для теплотехнічного розрахунку вогнезахищеної залізобетонної колони. Створення основ для ефективного оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних будівельних конструкцій з науково обґрунтованими параметрами вогнезахисних покриттів є актуальною проблемою, розв'язання якої призведе до підвищення точності теплотехнічного розрахунку вогнезахищених залізобетонних колон з необхідною для інженерних розрахунків досконалістю. З огляду на це розроблено комп'ютерну модель для моделювання нестационарного прогріву вогнезахищеної залізобетонної колони, що дає змогу оцінювати вогнестійкість як незахищених, так і вогнезахищених залізобетонних колон, враховувати властивості матеріалів колон та вогнезахисного покриття. Алгоритм оцінювання містить виконання експериментальних та розрахункових процедур під час визначення вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних колон. За допомогою розробленої моделі проведено моделювання нестационарного прогріву вогнезахищеної залізобетонної колони за стандартного температурного режиму пожежі. Особливістю моделювання нестационарного прогріву вогнезахищеної залізобетонної колони полягає у задаванні теплофізичних характеристик вогнезахисного покриття під час розв'язання задачі нестационарної теплопровідності. Під час визначення ефективності розробленої моделі було проведено порівняння результатів чисельного моделювання прогріву залізобетонної колони з результатами експериментального дослідження вогнестійкості залізобетонної колони. Також було запропоновано моделювання вогнезахисту залізобетонної колони для підвищення меж вогнестійкості до необхідних значень межі вогнестійкості. Підтвердженням адекватності розробленої моделі є задовільна збіжність експериментальних та розрахункових температур. Особливістю розробленої комп'ютерної моделі є можливість моделювання нестационарного прогріву вогнезахищених залізобетонних колон з урахуванням їх початкових та граничних умов, геометрії, характеристик матеріалів, класу бетону, класу арматури, теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів, умов випробувань та умов обігріву.

**Постановка проблеми.**

Забезпечення безпеки людей і матеріальних цінностей необхідно виконувати з урахуванням усіх стадій життєвого циклу об'єктів, а саме – це науковий супровід, моніторинг, проектування, будівництво, експлуатація, а також унеможливлення пожежі [1].

Запобігти виникненню пожежі дають змогу технічні засоби та організаційні заходи, за яких ймовірність її виникнення та розвитку не перевищує нормованого допустимого значення.

Одним із факторів, на якому ґрунтуються вимоги пожежної безпеки під час проектування, будівництва, реконструкції, зміни функціонального призначення будівель та споруд різного призначення є забезпечення вогнестійкості будівельних конструкцій. Умовою зниження незворотних наслідків пожеж на об'єктах різного призначення є збереження несучої здатності будівельних конструкцій, технологічних споруд і комунікацій.

З огляду на зазначене вище в умовах глобалізації й збільшення загроз для людини найбільше значення має саме збереження стійкості будівель та споруд під час пожеж, а також збереження їх функціонального призначення після таких впливів.

Створення методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій з науково обґрунтованими параметрами вогнезахисних покриттів є актуальним. Розв'язання цієї проблеми призведе до підвищення точності розрахунку за нестационарного прогріву вогнезахисних залізобетонних колон з необхідною для інженерних розрахунків точністю. Це можливо реалізувати завдяки чисельному моделюванню в сучасних програмних комплексах.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вимоги стійкості будівельних конструкцій внаслідок дії високих температур забезпечуються комплексом заходів, що передбачаються як технологією виробництва, так і застосуванням ефективних вогнезахисних покриттів [2].

У [3] розглянуто питання, пов'язані з підвищенням вогнестійкості залізобетонних конструкцій через використання вогнезахисних покриттів. Наведено дані експериментальних досліджень швидкості нагрівання цегли, покритої алюмінієвим шаром, що є вогнезахисним покриттям. Дослідження проводилися через порівняння зміни у часі температури матеріалу з нанесеним алюмінієвим шаром із температурою без нанесеного алюмінієвого шару. Отримані результати досліджень свідчать про зниження швидкості нагрівання облицювальної цегли під дією теплового нагрівання. Однак поза увагою дослідників залишилися питання обґрунтування параметрів покриття на основі алюмінію для захисту залізобетонних конструкцій.

У [4] основна увага приділена дослідженню вогнестійкості залізобетонних колон під час випробувань за стандартного температурного режиму пожежі. Проводилась оцінка залишкової міцності колон на стиск після впливу стандартної пожежі протягом 60 та 120 хв і за різного навантаження (20 % і 40 % від розрахункового осьового навантаження колони). Внаслідок проведення випробувань встановлено, що колони не відновлюють свою початкову міцність після впливу стандартного температурного режиму пожежі. Залишкова міцність колон на стиск зменшилась майже до 50 % і 30 % від межі міцності, які зазнали впливу протягом 60 та 120 хв пожежі. Незважаючи на практичну значущість таких результатів, достатньою мірою не розглянуто питання щодо розрахунків вогнезахисних залізобетонних колон.

У [5] проаналізовано руйнування залізобетонних колон після впливу високих температур за різних температурних режимів пожежі. Зроблено висновок, що у разі оцінювання надійності залізобетонної колони необхідно враховувати реальний температурний режим пожежі. Однак залишилися невирішеними питання прогнозування меж вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних колон за реальних режимів

пожежі з використанням сучасних програмних комплексів. Вочевидь це пов'язано з труднощами побудови кінцево-елементної моделі вогнезахищеної конструкції в таких комплексах і правильного задавання параметрів вогнезахисних матеріалів.

Автори [6] свої зусилля зосередили на вивченні несучої здатності залізобетонних колон, що піддаються одночасному впливу високої температури та осьового навантаження. Для проведення чисельних досліджень було розроблено нелінійні моделі у програмі ABAQUS з використанням процедури аналізу «температура-переміщення». Проте поза увагою дослідників залишилися питання оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних колон, а також вплив параметрів вогнезахисних покриттів на вогнестійкість конструкцій.

У [7] автори розробили чисельну модель для вивчення взаємозв'язку між вогнестійкістю залізобетонних колон та найбільш важливими параметрами, зокрема такими, як: рівень навантаження, коефіцієнт гнучкості, ексцентриситет навантаження, товщина захисного шару бетону, форма та розмір поперечного перерізу. Модель використовує метод Ньютона-Рафсона для визначення розподілу деформації в поперечному перерізі нагрітої колони. Однак, незважаючи на прогрес у вивченні взаємозв'язку між вогнестійкістю залізобетонних колон та найбільш важливими параметрами, невирішеними залишилися питання теплотехнічного розрахунку вогнезахищених залізобетонних колон.

У [8] описані прості аналітичні методи для прогнозування поведінки залізобетонних колон, які піддаються впливу вогню. Зважаючи на аналіз, передбачено навантаження (без початкового ексцентриситету) або еквівалентне осьове навантаження для врахування ефектів першого та другого порядку. Однак у запропонованій в роботі моделі не враховується використання вогнезахищених залізобетонних

конструкцій з науково обґрунтованими параметрами вогнезахисних покриттів. Це накладає певні обмеження на аналіз вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних конструкцій за допомогою розробленої моделі.

У [9] наведена спрощена модель для оцінки вогнестійкості залізобетонних колон, що піддаються впливу навантаження та вогню. Для визначення температурного поля перерізу під час дії полум'я пожежі використовується метод кінцевих різниць. Проте не визначено, як цю модель можна застосовувати для оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних конструкцій. З погляду практики, це може зумовити труднощі, що пов'язані з урахуванням теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів для підвищення меж вогнестійкості залізобетонних конструкцій.

У [10] наводяться результати дослідження з моделювання впливу пожежі на вогнестійкість колон з високоміцного бетону за допомогою універсальної моделі для аналізу поведінки колон за високотемпературного впливу. Запропонована модель може бути використана для визначення кривих навантаження-прогин та прогнозування пікових навантажень колони за температури навколишнього середовища. Незважаючи на практичну значущість отриманих результатів, достатньою мірою не розглянуто питання щодо розрахунків вогнезахищених залізобетонних конструкцій. Вочевидь це пов'язано з труднощами побудови моделі вогнезахищеної конструкції в зазначеному програмному комплексі та точному задаванні параметрів вогнезахисних матеріалів.

У [11] автори розробили модель визначення вогнестійкості залізобетонних колон через урахування впливу різних ключових параметрів: передчасне розтріскування бетону під час пожежі, ефект місцевого випучування поздовжньої арматури, спричиненого вибуховим сколюванням. Також модель включає ефект



локального вигину поздовжньої арматури, зумовлений вибуховим розколюванням. Проте в роботі залишилися нерозкритими питання щодо побудови моделі вогнезахищених залізобетонних конструкцій, а саме – залізобетонних колон.

Систематизація результатів наведених досліджень дає змогу констатувати факт, що сучасні підходи до оцінювання вогнестійкості залізобетонних конструкцій спираються на експериментальні та частково розрахункові процедури. Вочевидь це дає змогу знаходити ухвалені рішення тільки в тому випадку, якщо кожного разу проводити експериментальні випробування одного типу та розмірів залізобетонної колони. Для розрахункового методу це діє, якщо відомі з заданою точністю параметри теплової моделі та математичний опис процесу в системі «залізобетонна колона – вогнезахисне покриття». З огляду на це можна зробити висновок, що порушення вказаних умов не дає можливості отримання оптимальних рішень для теплотехнічного розрахунку вогнезахищеної залізобетонної колони.

Таким чином, проблема оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних будівельних конструкцій може бути розв'язана через розроблення кінцево-елементної моделі для оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних колон з науково обґрунтованими параметрами вогнезахисних покриттів. Розроблена модель має базуватися на отриманні результатів з необхідною для інженерних розрахунків точністю як з використанням даних експериментальних досліджень, так і за результатами чисельного моделювання в сучасних програмних комплексах.

**Формулювання цілей досліджень.** За мету ставилось

розроблення комп'ютерної моделі для оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних колон, яка створена в програмному комплексі ЛІРА-САПР.

Для досягнення поставленої мети потребували вирішення такі завдання:

– розробити комп'ютерну модель для оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних колон у програмному комплексі ЛІРА-САПР;

– провести моделювання нестационарного прогріву залізобетонної колони в програмному комплексі ЛІРА-САПР;

– провести моделювання вогнезахисту залізобетонної колони у програмному комплексі ЛІРА-САПР для підвищення вогнестійкості до нормованих значень та оцінку точності розробленої моделі.

**Методи дослідження.** Межа вогнестійкості колон визначалася за ДСТУ Б В.1.1-4-98\* та ДСТУ Б В.1.1-14:2007. Метод полягав у нагріві за стандартного температурного режиму згідно з ДСТУ Б В.1.1-4-98\* зразків колон, які встановлювалися у вогневу піч, та визначенні часу, коли досягається граничний стан за ознакою втрати несучої здатності, що визначається з огляду на розподіл температур (арматури та бетону) по перерізу колони під час випробувань. Несуча здатність може бути оцінена щодо перевищення середньої температури несучих арматур, які більш наближені до поверхні, від їх початкового значення температури на 480 °С.

Об'єктом випробування були два зразки – фрагменти залізобетонних колон квадратного перерізу з фактичним розміром 600×600 мм та висотою 2000 мм (рис. 1).

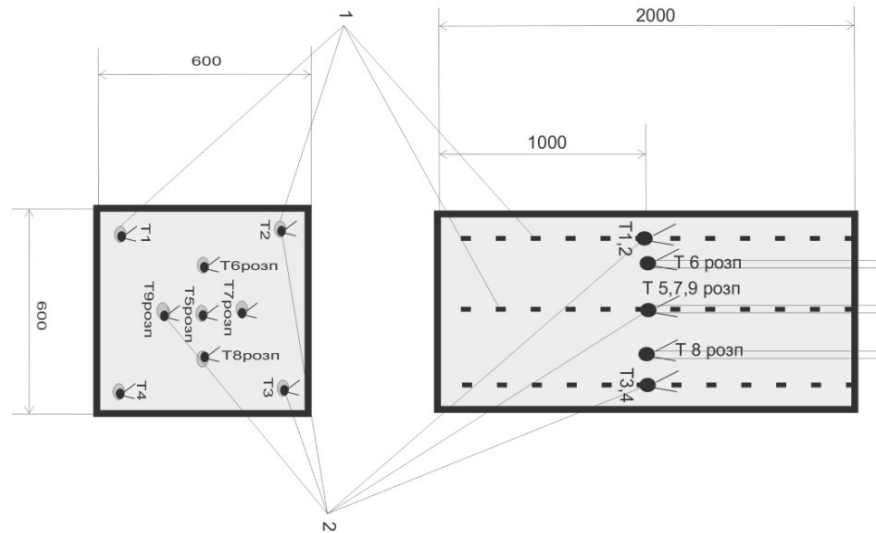


Рисунок 1 – Схема розташування термопар на зразку: 1 – несучі арматурні стрижні; 2 – термопари

Джерело: розробка авторів

Кожний зразок мав несучий каркас, що складався з 16-ти вертикальних несучих арматур  $\text{Ø}20$  мм А400С. Арматура зв'язку  $\text{Ø}10$  мм А400С у кількості 26 одиниць закладалась по зовнішньому контуру несучих арматур та арматура зв'язку  $\text{Ø}10$  мм А400С у кількості 6 одиниць закладалась між центральними боковими арматурами. Бетон – класу С25.

За результатами обстеження зразків після випробування фактичне середнє значення товщини захисних шарів до вісі несучої арматури складало 51 мм. Випробування проводилося за стандартного температурного режиму пожежі. Результати вимірювань температур несучої арматури та температури по перерізу зразків наведено на рис. 2.

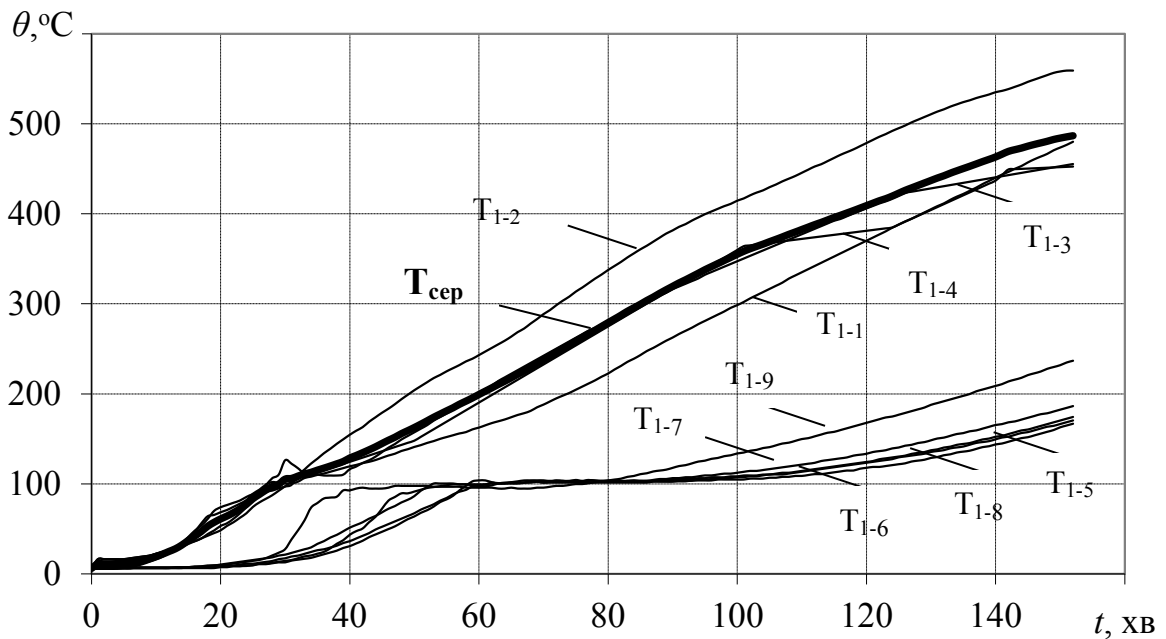


Рисунок 2 – Температура несучих арматурних стрижнів ( $T_{1-1}$ - $T_{1-4}$ ), середня ( $T_{сер}$ ) та по перерізу ( $T_{1-5}$ - $T_{1-9}$ ) зразка № 1 колони

Джерело: розробка авторів

Початкова температура повітря під час випробувань складала  $6^{\circ}\text{C}$ , відносна вологість повітря – 60 %.

Для більшості матеріалів надаються дані щодо характеристик показників лише за кімнатної температури, чи взагалі таких даних немає. Цей факт є однією з причин обмеженого використання розрахункових методів, заснованих на математичному моделюванні процесів теплообміну для розв'язання задач проектування вогнестійких конструкцій, а саме – вогнезахисних залізобетонних конструкцій.

Використовуючи результати випробувань на вогнестійкість, виконано чисельне моделювання прогріву залізобетонної колони в програмному комплексі ЛПА-САПР (ліцензія № 1/8583 від 16.02.2022).

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Алгоритм розроблення комп'ютерної моделі залізобетонної колони в програмному комплексі ЛПА-САПР являє собою систему рівнянь, розв'язок яких дає змогу отримати значення температури у кожному вузлі координатної сітки, що накладалася на переріз. Координатна сітка накладалася так, щоб її вузли розташовувалися не тільки в товщині перерізу, а й по периметру, а також у центрі стрижнів для конструкцій з гнучкою арматурою, по довжині полиць і стінки всередині їхньої товщини для конструкцій з жорсткою арматурою. Для більш точних розрахунків розробники програми крок сітки рекомендують задавати в межах 0,01–0,03 м, але він обов'язково має бути більшим за максимальний діаметр робочої арматури. Одним із найважливіших етапів кінцево-елементного аналізу є побудова сітки кінцевих елементів. Точність розрахунку за допомогою методу кінцевих елементів залежить від правильного вибору типів та розмірів кінцевих елементів. Ми вибрали прямокутну сітку з чотирма вузлами, що дає більш точні результати, ніж сітка з трикутними елементами. Це пояснюється таким чином. Дрібна сітка потрібна там, де очікується великий градієнт деформацій чи

напруг (отвір, виточення, тріщина тощо). У той же час сітка великих розмірів може застосовуватися в зонах із деформаціями або напруженнями, що мало змінюються, а також в областях, що не становлять особливого інтересу для розрахунків. Таким чином, сітка кінцевих елементів має в основі наближені до квадратів елементи, що є для розрахунку матриці ідеальним варіантом, довжина елементів не перевищує  $1/10$  розміру поперечного перерізу, що відповідає рекомендації щодо формування сітки кінцевих елементів. Зменшення розмірів призведе до збільшення значної кількості кінцевих елементів, а це – до збільшення часу розрахунку і використання більш потужної обчислювальної техніки, проте на аналіз результатів впливу не матиме.

Проведено моделювання поперечного перерізу залізобетонної колони у 15-й ознаці схеми в програмному середовищі ЛПА-САПР (рис. 3). У побудованій комп'ютерній моделі в програмному комплексі ЛПА-САПР враховуються радіаційно-конвективний теплообмін у газовому середовищі від джерела теплового впливу до поверхні конструкції та теплообмін теплопровідністю у залізобетонній колоні, а також проводяться розрахунки із застосуванням граничних умов третього роду і граничних умов складного радіаційно-конвективного теплообміну.

Під час моделювання нестационарного прогріву залізобетонної колони в програмному комплексі ЛПА-САПР використана модель колони (рис. 3), яка обігривається з чотирьох боків за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі. Теплофізичні і механічні характеристики залізобетону та сталі [12] задані залежними від температури. Коефіцієнт теплопровідності та питома об'ємна теплоємність бетону колони були знайдені розв'язанням обернених задач теплопровідності за результатами випробувань на вогнестійкість [13].

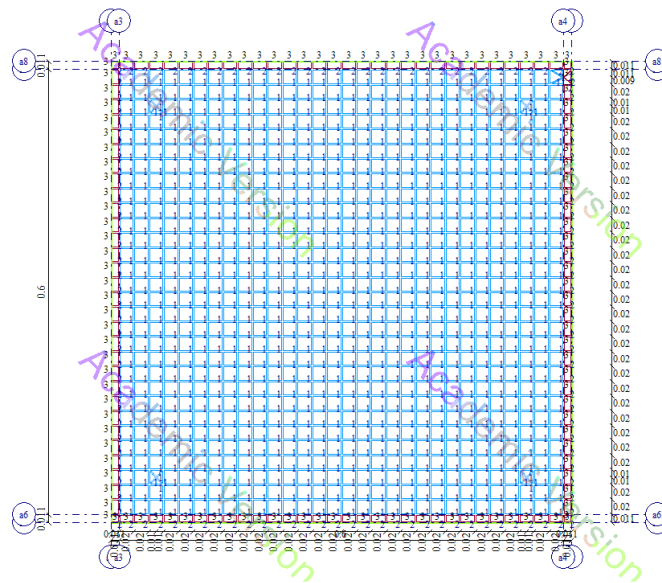


Рисунок 3 – Кінцево-елементна модель залізобетонної колони з типами елементів жорсткості Джерело: розробка авторів

Коефіцієнти тепловіддачі та теплового випромінювання задані константами. Початкова температура конструкції 6 °С.

Інші параметри для моделювання теплового стану залізобетонної колони задавалися згідно з [14]:

$\Phi$  – кутовий коефіцієнт,  $\Phi = 1,0$ ;

$\varepsilon_m$  – коефіцієнт теплового випромінювання обігрівної поверхні покриття,  $\varepsilon_m = 0,7$ ;

$\varepsilon_f$  – коефіцієнт теплового випромінювання полум'я,  $\varepsilon_f = 1,0$ ;

$\sigma$  – стала Стефана Больцмана,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup> · °С<sup>4</sup>);

$\rho$  – густина бетону,  $\rho = 2300$  кг/м<sup>3</sup>.

За допомогою чисельного моделювання були отримані розподіли температур у залізобетонній колоні на 30, 60, 90 та 120 хв вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі під час обігріву колони з чотирьох боків (рис. 4).

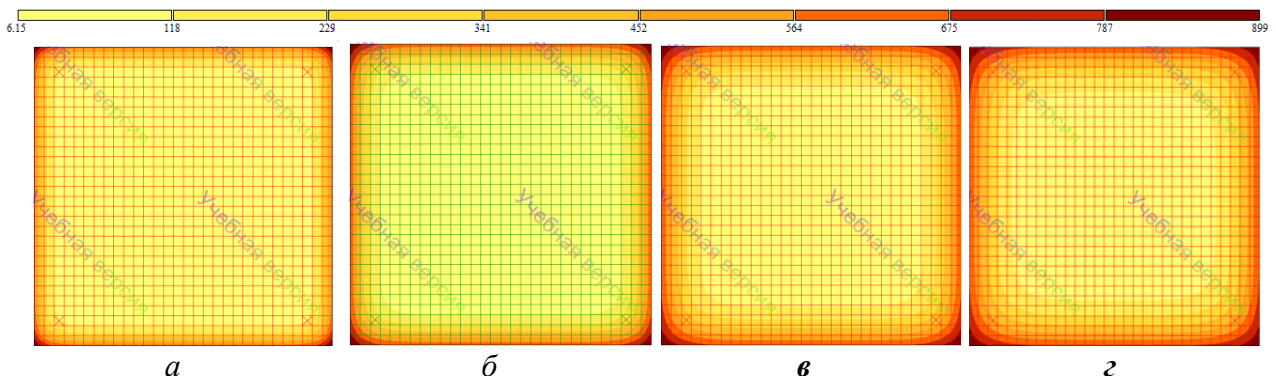


Рисунок 4 – Розподіл температур у залізобетонній колоні на 30 (а), 60 (б), 90 (в) та 120 (г) хвилинах випробування

Джерело: розробка авторів

На рис. 5 показано, що криві зміни середньої температури несучих арматурних стрижнів від 20 до 50 хв

випробування мають незначні розбіжності, проте після 50 хв встановлено задовільну збіжність експериментальних та

розрахункових температур. Водночас найбільше відхилення температури спостерігалось на 60 хв розрахунку і становило  $13^{\circ}\text{C}$ , що відповідає похибці 7%. (Ці твердження суперечать одне одному) Це підтверджує правильність

побудови комп'ютерної моделі в програмному комплексі ЛІРА-САПР для оцінювання вогнестійкості залізобетонних колон та її використання під час моделювання прогріву залізобетонних конструкцій інших видів.

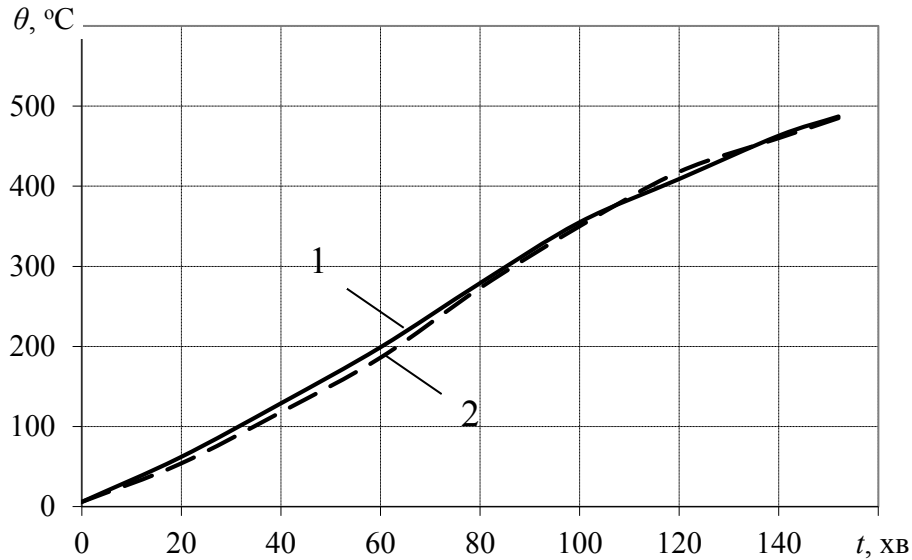


Рисунок 5 – Середня температура на несучих арматурних стрижнях на 152 хв прогріву незахищеної залізобетонної колони: 1 – експериментальна крива; 2 – розрахункова

Джерело: розробка авторів

Як видно з рис. 5, крива 2 зміни температури на несучих арматурних стрижнях від часу вогневого впливу задовільно корелює з експериментальною кривою 1 і за 120 хв прогріву за стандартним температурним режимом пожежі арматурні стрижні колони прогрілися до  $400^{\circ}\text{C}$ . Ця модель надалі використовувалась для моделювання вогнестійкості вогнезахисених

залізобетонних колон у разі забезпечення меж вогнестійкості більше 120 хвилин.

Використовуючи створену в програмному комплексі ЛІРА-САПР модель (рис. 3) та теплофізичні характеристики досліджуваного пасивного вогнезахисного покриття для підвищення вогнестійкості залізобетонних конструкцій було побудовано модель вогнезахисеної залізобетонної колони (рис. 6).

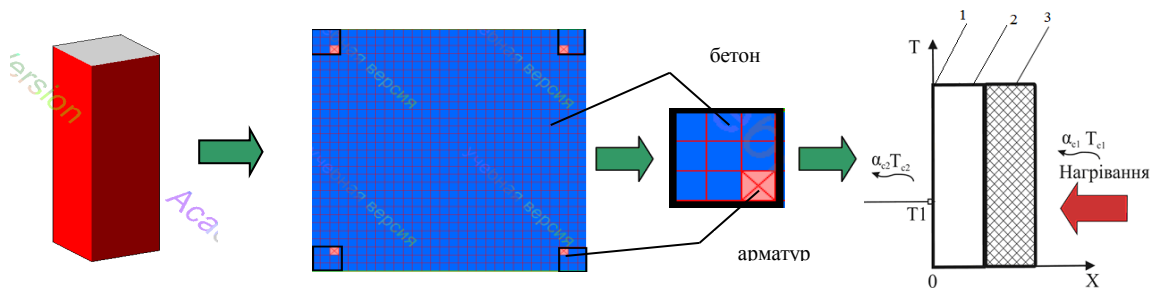


Рисунок 6 – Модель вогнезахисеної залізобетонної колони: 1 – арматурний стрижень; 2 – бетон; 3 – вогнезахисне покриття;  $T_1$  – термопара, встановлена на арматурі

Теплофізичні характеристики вогнезахисного покриття, які залежать від температури [13–14], наведено на рис. 7.

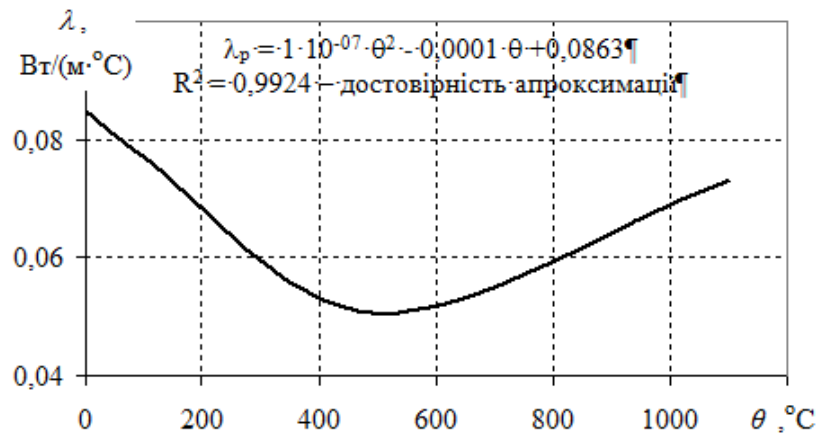


Рисунок 7 – Коефіцієнт теплопровідності вогнезахисного покриття

Джерело: розробка авторів

Питома об'ємна теплоємність покриття була знайдена розв'язанням обернених задач теплопровідності і склала  $C_v = 10^6$  Дж/м<sup>3</sup>·°С. Водночас густина покриття складає  $\rho_p = 500$  кг/м<sup>3</sup> і, як наслідок, питома теплоємність покриття для розрахунків бралася рівною 2000 Дж/(кг·°С). Закономірність поведінки коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного покриття описується регресійною залежністю виду:  $\lambda_p = 1 \cdot 10^{-07} \cdot \theta^2 - 0,0001 \cdot \theta + 0,0863$  з достовірністю апроксимації 0,9924 (рис. 7).

За допомогою розробленої моделі (рис. 6), використовуючи теплофізичні характеристики покриття (рис. 7), проведено моделювання вогнезахисту

залізобетонної колони. Внаслідок проведених досліджень встановлено, що для підвищення межі вогнестійкості залізобетонної колони розмірами 600×600 мм до 180 хв необхідно запроєктувати вогнезахист як пасивне вогнезахисне покриття [14]. Водночас товщина вогнезахисного покриття згідно з розрахунками склала 11 мм на основі розв'язання прямих задач теплопровідності у програмному комплексі FRIEND [14].

На рис. 8 наведені результати моделювання нестационарного прогріву вогнезахисної залізобетонної колони на 120 хв випробування з товщиною вогнезахисного покриття 11 м.

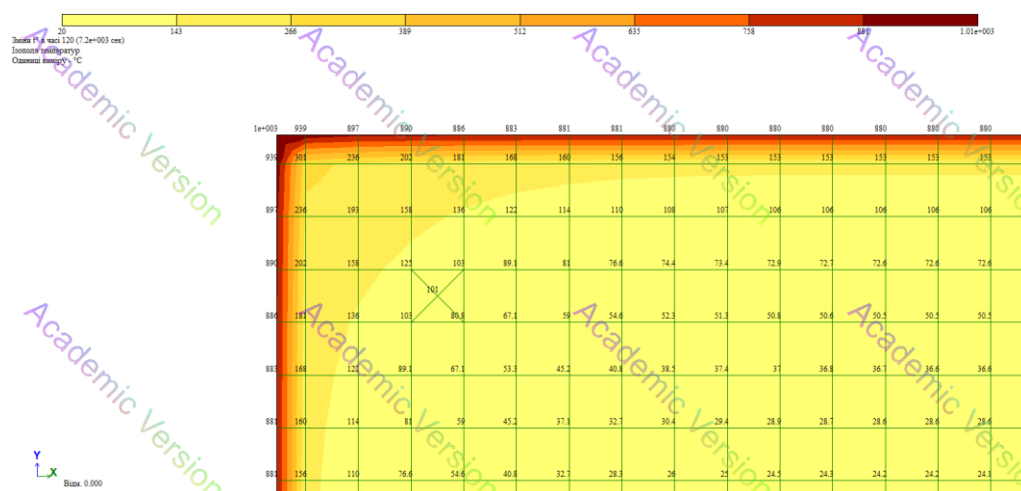


Рисунок 8 – Розподіл температур у вогнезахисній залізобетонній колоні на 120 хв випробування

Джерело: розробка авторів

Як видно із рис. 8, 11 мм товщина пасивного вогнезахисного покриття здатна

знижити температуру прогріву арматурних стрижнів на 120 хв вогневого впливу

вчетверо. Ця обставина вказує на ефективність використання вогнезахисних залізобетонних конструкцій і дає можливість проектувати вогнезахист залізобетонних колон залежно від забезпечення нормованих меж вогнестійкості конструкцій.

Особливість теплотехнічного розрахунку вогнезахисної залізобетонної колони полягала у правильному задаванні теплофізичних характеристик вогнезахисного покриття під час розв'язання задачі нестационарної теплопровідності. Порівняно з наявними моделями для розрахункового оцінювання вогнестійкості залізобетонних конструкцій розроблена модель дає змогу моделювати вогнезахист залізобетонних колон з урахуванням типу та теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів. Під час оцінювання точності розробленої моделі було проведено порівняння результатів чисельного моделювання прогріву залізобетонної колони з результатами експериментального дослідження вогнестійкості. Також здійснено моделювання вогнезахисту залізобетонної колони для підвищення меж вогнестійкості до нормованих значень межі вогнестійкості. Підтвердженням точності розробленої моделі є задовільна збіжність експериментальних та розрахункових температур. Особливістю розробленої кінцево-елементної моделі є можливість чисельного моделювання нестационарного прогріву вогнезахисних залізобетонних колон з урахуванням їх геометрії, характеристик матеріалів, з яких складається конструкція, класу бетону, теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів. Недоліком є те, що розрахунку піддається окремо взята залізобетонна конструкція (колона) без урахування зв'язку з іншими. Не враховується сумісна робота конструкцій будівлі чи споруди. Неможливість зняти вказані обмеження в межах цього дослідження породжує потенційно необхідний напрям подальших досліджень.

Таким чином, через розроблення моделі вогнезахисної залізобетонної

колони та розв'язання безпосередніх задач теплопровідності з заданими граничними умовами та теплофізичними характеристиками бетону, арматури, вогнезахисного покриття можливо змодельовати вогнезахист колон. Водночас можливо моделювати вогнезахист залізобетонних колон для різних значень межі вогнестійкості та з використанням різних вогнезахисних покриттів зі своїми властивостями.

**Висновки та напрями подальших досліджень.** 1. Розроблено комп'ютерну модель вогнезахисної залізобетонної колони в програмному середовищі ЛІРА-САПР. Це дає змогу досліджувати нестационарний прогрів як вогнезахисних, так і незахищених залізобетонних конструкцій, враховує радіаційно-конвективний теплообмін у газовому середовищі від джерела теплового впливу до поверхні конструкції та теплообмін теплопровідністю у залізобетонній колоні. Водночас враховуються теплофізичні властивості матеріалів конструкції та вогнезахисних покриттів.

2. За допомогою розробленої моделі проведено моделювання нестационарного прогріву залізобетонної колони в умовах випробування за стандартного температурного режиму пожежі. Доведено працездатність розробленої моделі для оцінювання вогнестійкості залізобетонних колон та її використання під час моделювання прогріву залізобетонних конструкцій інших видів. Модель може використовуватись для проектування вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних колон у разі забезпечення їх нормованих меж вогнестійкості.

3. Запропоновано через розроблення моделі вогнезахисної залізобетонної колони та розв'язання прямих задач теплопровідності з заданими граничними умовами і теплофізичними характеристиками бетону, арматури, вогнезахисного покриття виконувати моделювання вогнезахисту залізобетонних колон. Водночас можливо проектувати вогнезахист залізобетонних колон для

різних значень межі вогнестійкості та з використанням різних типів вогнезахисних покриттів з науково обґрунтованими параметрами. Перевірено точність розробленої моделі та доведено можливість її використання для оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних колон та проєктування вогнезахисту для підвищення меж вогнестійкості до нормованих значень. Подальші

дослідження можуть бути орієнтовані на розроблення комп'ютерної моделі конструктивної схеми будівлі з використанням вогнезахисних будівельних конструкцій, виготовлених з різних матеріалів. Розвиток зазначеного дослідження полягає у розробленні методу, який би давав змогу оцінювати вогнестійкість вогнезахисних конструкцій у разі сумісної роботи.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Отрош Ю. А. Використання системи моніторингу для оцінки технічного стану будівельних конструкцій. *Промислове будівництво та інженерні споруди*. 2018. № 3. С. 3–7.
2. Ковальов А. І., Отрош Ю. А., Данілін О. М. Експериментальні дослідження вогнестійкості залізобетонних перекриттів з системою вогнезахисту. *Проблеми пожежної безпеки: Зб. наук. пр.* Харків, 2019. Вип. 45. С. 73–78.
3. Korytchenko K., Samoilenko D., Dubinin D., Kucherskyi V., Krivoruchko Y. Enhancing the fire resistance of concrete structures by applying fire retardant temperature-resistant metal coatings. *In Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1038 MSF. P. 500–505. doi : 10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.500.
4. Nair A., Salem O. (Sam). Experimental determination of the residual compressive strength of concrete columns subjected to different fire durations and load ratios. *Journal of Structural Fire Engineering*. 2020. 11(4). P. 529–543. doi : 10.1108/JSFE-10-2019-0034.
5. Song T., Bai L. Failure analysis of reinforced concrete columns after high temperature. *In Applied Mechanics and Materials*. 2012. Vol. 157. P. 1578–1581.
6. Pul S., Atasoy A., Senturk M., Hajirasouliha I. Structural performance of reinforced concrete columns subjected to high-temperature and axial loading under different heating-cooling scenarios. *Journal of Building Engineering*. 2021. 42. doi : 10.1016/j.job.2021.102477.
7. Mahmoud K. A. Fire resistance-effective parameters relationships of slender rectangular and circular RC columns. *Fire Safety Journal*. 2021. 125. doi : 10.1016/j.firesaf.2021.103442.
8. Buttignol T. E. T., Bittencourt T. N. Simplified design procedures for the structural analysis of reinforced concrete columns in fire. *Engineering Structures*. 2021. P. 246. doi : 10.1016/j.engstruct.2021.113076.
9. Peña D. L., Albero V., Ibáñez C., Hospitaler A. Sectional model for the fire evaluation of reinforced concrete columns subjected to biaxial bending. *Engineering Structures*. 2021. P. 247. doi : 10.1016/j.engstruct.2021.113094.
10. Du P., Yang Y., Tan K. H. Analytical modelling of high strength concrete columns under ambient and fire conditions. *Engineering Structures*. 2021. 247. doi : 10.1016/j.engstruct.2021.113216.
11. Buch S. H., Sharma U. K. Empirical model for determining fire resistance of Reinforced Concrete columns. *Construction and Building Materials*. 2019. 225. P. 838–852. doi : 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.183.
12. EN 1993-1-2 : 2005. Eurocode 3, Design of steel structures, Part 1.2, general rules – Structural fire design.
13. Kovalov A., Otrosh Y., Semkiv O., Konoval V., Chernenko O. Influence of the fire temperature regime on the fire-retardant ability of reinforced-concrete floors coating. *In Materials Science Forum*. 2020. Vol. 1006. P. 87–92.
14. Fire resistance of reinforced concrete and steel structures: monograph / V. Sadkovi, E. Rybka, Yu. Otrosh and others. Kharkiv: PC TECHNOLOGY CENTER, 2021. 180 p.

### REFERENCES

1. Otrosh, Yu. A. (2018). Vykorystannia systemy monitorynhu dlia otsinky tekhnichnoho stanu budivelnnykh konstruksii. *Promyslove budivnytstvo ta inzhenerni sporudy*, № 3, 3–7 [in Ukrainian].
2. Kovalov, A. I., Otrosh, Yu. A., Danilin, O. M. (2019). Eksperymentalni doslidzhennia vohnestiikosti zalizobetonnykh perekryttiv z systemoiu vohnezakhystu. *Problemy pozhhezhnoyi bezpeky* : Zb. nauk. pr. Kharkiv, 45, 73–78 [in Ukrainian].
3. Korytchenko, K., Samoilenko, D., Dubinin, D., Kucherskyi, V., & Krivoruchko, Y. (2021). Enhancing the fire resistance of concrete structures by applying fire retardant temperature-resistant metal coatings. *In Materials Science Forum*, 1038 MSF, 500–505. doi : 10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.500 [in English].
4. Nair, A., & Salem, O. (Sam). (2020). Experimental determination of the residual compressive strength of concrete columns subjected to different fire durations and load ratios. *Journal of Structural Fire Engineering*, 11(4), 529–543. doi : 10.1108/JSFE-10-2019-0034 [in English].
5. Song, T., Bai, L. L. (2012). Failure analysis of reinforced concrete columns after high temperature. *In Applied Mechanics and Materials*, 157, 1578–1581 [in English].
6. Pul, S., Atasoy, A., Senturk, M., & Hajirasouliha, I. (2021). Structural performance of reinforced concrete columns subjected to high-temperature and axial loading under different heating-cooling scenarios. *Journal of Building Engineering*, 42. doi : 10.1016/j.job.2021.102477 [in English].
7. Mahmoud, K. A. (2021). Fire resistance-effective parameters relationships of slender rectangular and circular RC columns. *Fire Safety Journal*, 125. doi : https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103442 [in English].
8. Buttignol, T. E. T., & Bittencourt, T. N. (2021). Simplified design procedures for the structural analysis of reinforced concrete columns in fire. *Engineering Structures*, 246. doi : 10.1016/j.engstruct.2021.113076 [in English].



9. Peña, D. L., Albero, V., Ibáñez, C., & Hospitaler, A. (2021). Sectional model for the fire evaluation of reinforced concrete columns subjected to biaxial bending. *Engineering Structures*, 247. doi : 10.1016/j.engstruct.2021.113094 [in English].
10. Du, P., Yang, Y., & Tan, K. H. (2021). Analytical modelling of high strength concrete columns under ambient and fire conditions. *Engineering Structures*, 247. doi : 10.1016/j.engstruct.2021.113216 [in English].
11. Buch, S. H., & Sharma, U. K. (2019). Empirical model for determining fire resistance of Reinforced Concrete columns. *Construction and Building Materials*, 225, 838–852. doi : 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.183 [in English].
12. EN 1993-1-2:2005. Eurocode 3, Design of steel structures, Part 1.2, general rules – Structural fire design [in English].
13. Kovalov, A., Otrosh, Y., Semkiv, O., Konoval, V., Chernenko, O. (2020). Influence of the fire temperature regime on the fire-retardant ability of reinforced-concrete floors coating. *In Materials Science Forum*, 1006, 87–92. [in English].
14. Fire resistance of reinforced concrete and steel structures: monograph / V. Sadkovyi, E. Rybka, Yu. Otrosh and others. Kharkiv: PC TECHNOLOGY CENTER, 2021, 180 p. [in English].

## SIMULATION OF UNSTATIONARY HEATING OF FIREPROOF REINFORCED CONCRETE COLUMNS

A. Kovalov<sup>1</sup>, R. Purdenko<sup>2</sup>, Yu. Otrosh<sup>1</sup>, V. Tomenko<sup>3</sup>, N. Rashkevich<sup>1</sup>, S. Yurchenko<sup>4</sup>

<sup>1</sup>National University of Civil Defence of Ukraine, Ukraine

<sup>2</sup>Private enterprise «ProjectBudStar», Ukraine

<sup>3</sup>Cherkassy institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine

<sup>4</sup>Cherkasy Scientific Research Forensic Centre of the Ministry of Internal Affairs in Ukraine, Ukraine

---

### KEYWORDS: ANNOTATION

fire resistance,  
simulation of non-stationary heating,  
reinforced concrete column,  
fire protection,  
fireproof coating,  
LIRA-SAPR

The analysis of the results of studies of the fire resistance of reinforced concrete structures was carried out and it was established that the existing approaches to the assessment of fire resistance do not always allow obtaining optimal solutions for the thermal engineering calculation of a fire-resistant reinforced concrete column. Creation of foundations for effective assessment of fire resistance of fire-resistant reinforced concrete building structures with scientifically based parameters of fire-resistant coatings is an urgent problem. Solving this problem will lead to an increase in the accuracy of thermal engineering calculation of fire-resistant reinforced concrete columns with the accuracy required for engineering calculations. In this regard, the authors developed a finite element model for simulating non-stationary heating of a fire-resistant reinforced concrete column. The model allows you to evaluate the fire resistance of both unprotected and fire-protected reinforced concrete columns, take into account the properties of the column material and the material of the fire-resistant coating. The evaluation algorithm includes the implementation of experimental and calculation procedures when determining the fire resistance of fire-resistant reinforced concrete columns. The authors modeled the non-stationary heating of a fire-resistant reinforced concrete column at the standard fire temperature regime using the developed model. The determination of the thermophysical characteristics of the fire-resistant coating when solving the problem of non-stationary thermal conductivity is a feature of modeling the non-stationary heating of a fire-resistant reinforced concrete column. When determining the effectiveness of the developed model, a comparison was made of the results of numerical modeling of the heating of a reinforced concrete column with the results of an experimental study of the fire resistance of a reinforced concrete column. The authors proposed modeling the fire protection of a reinforced concrete column to increase the fire resistance limits to the required values of the fire resistance limit. The adequacy of the developed model is confirmed by the satisfactory convergence of the experimental and calculated temperatures. The possibility of modeling non-stationary heating of fire-resistant reinforced concrete columns taking into account their initial and boundary conditions, geometry, material characteristics, concrete class, reinforcement class, thermophysical characteristics of fire-resistant coatings, test conditions and heating conditions is a feature of the developed finite element model.

УДК 614.849

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕВАКУАЦІЇ ЛЮДЕЙ РІЗНИХ ГРУП МОБІЛЬНОСТІ З ТОРГОВЕЛЬНО-РОЗВАЖАЛЬНОГО ЦЕНТРУ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2.99-107>

Ковалишин В. В.<sup>1</sup>, ORCID iD 0000-0002-5463-0230

Доценко О. Г.<sup>2\*</sup>, ORCID iD 0000-0001-7437-8733

Хлевной О. В.<sup>1</sup>, ORCID iD 0000-0003-2846-3480

Дивень В. І.<sup>3</sup>, ORCID iD 0000-0002-5342-8858

\*E-mail: mio1488@yahoo.com

<sup>1</sup>Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна

<sup>2</sup>Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Україна

<sup>3</sup>Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, Україна

### ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції:

18.10.2022

Пройшла рецензування:

14.11.2022

### КЛЮЧОВІ СЛОВА:

торгівельно-розважальний центр, маломобільні групи населення, люди з інвалідністю, евакуація, рятування людей, поведінка людей під час пожежі, інклюзивність, пожежобезпечна зона, пожежно-рятувальні підрозділи, евакуація за допомогою пожежних ліфтів, поведінка персоналу під час пожежі, пожежа в торговельно-розважальному центрі, відвідувачі на кріслах колісних

### АНОТАЦІЯ

Наукова розвідка присвячена визначенню залежності швидкості руху людських потоків під час евакуації від перебування в них осіб, котрі пересуваються на кріслах колісних, їх щільності на різних ділянках шляху та спостереження за початком евакуації відвідувачів і дій персоналу, що в деяких випадках є одним з основних чинників, які впливають на час евакуації. Досліджено максимально наближену до реальної ситуацію – неанонсовану евакуацію, коли ні персонал, ні відвідувачі не знали про її навчальні цілі. Відеокамери фіксували поведінку людей та рух людських потоків з моменту спрацювання системи сповіщення до моменту виходу з будівлі та завершення евакуації людей із пожежобезпечних зон пожежно-рятувальними підрозділами. Отримано дані руху евакуації відвідувачів, котрі пересувалися на кріслах колісних з найвіддаленішої точки до пожежобезпечних зон, з яких проводилась евакуація. Встановлено загальний час евакуації відвідувачів, які пересувались на кріслах колісних, в який входить час прямування до пожежобезпечної зони, час очікування на пожежно-рятувальні підрозділи та евакуація із пожежобезпечних зон. Встановлено час евакуації людей, які пересуваються на кріслах колісних із пожежобезпечних зон, за допомогою пожежно-рятувальних підрозділів. Отримано дані щодо евакуації осіб, які пересуваються лише на кріслах колісних із пожежобезпечних зон, пожежно-рятувальними підрозділами за допомогою пожежних ліфтів в умовах, наближених до реальних. Визначено залежності швидкості руху людських потоків під час евакуації від перебування в них осіб з інвалідністю, які пересуваються на кріслах колісних, та розраховано їх щільність на різних ділянках шляху. За результатами проведеного експерименту відкориговано план евакуації з будівлі, досліджено навички персоналу щодо їх дій в умовах пожежі.

**Постановка проблеми.** Сучасний етап розвитку міст характеризується наявністю великої кількості об'єктів з масовим перебуванням людей (в тому числі людей з обмеженими можливостями), до яких належать торговельно-розважальні центри (далі – ТРЦ), театри, вокзали, аеропорти, а також

культові будівлі та споруди. Забезпечення безпеки людей через евакуацію у разі пожежі є одним із найважливіших завдань.

Останніми десятиліттями величезний розвиток отримали ТРЦ. Такі будівлі розраховані на одночасне обслуговування значної кількості відвідувачів і згідно з практикою більшість із них має складне

планування. Однією з їх особливостей також є наявність чималої пожежної навантаги.

Побудова гуманного та демократичного суспільства має передбачати підвищення уваги до всіх груп населення, особливо до слабких та хворих людей, якими можна вважати маломобільні групи осіб, котрі можуть потребувати допомоги під час пересування, отримання послуг, необхідної інформації або орієнтування в просторі.

Під захистом людей з фізичними обмеженнями слід розуміти не лише покращення їх соціального становища, підвищення доходів та якості життя, а й забезпечення їх безпеки. Першочерговим елементом забезпечення безпеки у разі пожежі є своєчасна та безперешкодна евакуація. На сьогодні евакуація таких людей є одним із найскладніших питань забезпечення безпеки під час пожежі. Це зумовлено не тільки особливостями їх організму, а й недостатнім вивченням процесу їх евакуації відносно евакуації здорових людей.

Порівняно з дослідженнями евакуації під час пожежі здорових людей, розпочатих на початку минулого століття, питання евакуації людей з фізичними обмеженнями вперше були розглянуті лише на початку 80-х років [1–2]. Протягом останніх десятиліть розрахунку часу евакуації людей з приміщень під час пожежі було присвячено багато досліджень і натурних експериментів, однак для повного вирішення проблеми напрацьованих матеріалів недостатньо.

Для їх доповнення, більш глибокого вивчення особливостей евакуації людей, які пересуваються на кріслах колісних, проведено натурний експеримент з визначення залежності швидкості змішаних людських потоків від груп мобільності M4 [3] та їх евакуації пожежно-рятувальними підрозділами за допомогою пожежних ліфтів в одному з ТРЦ міста Києва.

**Аналіз досліджень і публікацій.**  
Дослідження поведінки людини під час

пожежі давно розглядаються як окремий напрям і мають доволі інтенсивний розвиток [4]. Також багато досліджень присвячено розрахунку часу евакуації людей з приміщень під час пожежі. J. L. Pauls виділяє чотири основні етапи досліджень [5]. Дослідження евакуації з висотних будівель Канади [5] являють собою перший етап. Публікації праць ряду дослідників у книзі «Fire and Human Behaviour» під редакцією D. Canter та інші важливі доробки пов'язані з другим етапом [6]. Розвиток третього етапу характеризують наукові внески T. J. Shields [7], R. Fahy [8], G. Proulx [9], W. L. Saunders [10] та інших. Четвертим етапом, за класифікацією J. L. Pauls, є проведення першого міжнародного симпозіуму щодо досліджень поведінки людини під час пожежі [11], на якому були представлені роботи не тільки визнаних світовою спільнотою вчених, а й нових дослідників у цьому напрямі.

Результати досліджень показали, що у деяких випадках основним фактором, який впливає на час евакуації, є час, пов'язаний із затримкою початку евакуації, а не час прямування людей до евакуаційних виходів. G. Proulx та J. D. Sime [12] стверджують, що затримка часу початку евакуації може бути набагато більшою за час, який витратиться на рух до евакуаційних виходів. Тобто безпека людини під час пожежі має розглядатись не лише щодо руху або прямування, а й щодо поведінки людини.

О. Хлевний та В. Ковалишин виконали аналіз методів розрахунку часу евакуації, регламентованих чинним законодавством, та встановили відсутність у нормативних документах та науковій літературі даних, які б відображали закономірності руху змішаного потоку із дітей шкільного віку різних груп мобільності. Обґрунтовано необхідність формування емпіричної бази даних параметрів руху евакуаційних потоків у закладах середньої освіти з інклюзивним навчанням як наукового підґрунтя забезпечення нормування вимог пожежної

безпеки до евакуаційних шляхів і виходів у цих закладах [13–16].

**Методи дослідження.** Для здобуття та аналізування даних щодо поведінки людей під час евакуації, руху змішаних людських потоків та евакуації маломобільних людей, які пересуваються на кріслах колісних із пожежобезпечних зон, пожежно-рятувальні підрозділи застосовували метод отримання даних за допомогою фото- та відеофіксації. Використовували відеокамери служби безпеки і додаткові відеокамери, що були безпосередньо в експериментаторів.

Згідно зі сценарієм умовна пожежа сталася в одному з приміщень супермаркету, яку виявляє працівник. Він повідомляє адміністрацію закладу та ТРЦ і негайно оперативно-рятувальну службу

ДСНС України за номером «101». Своєю чергою відповідальна особа з адміністрації ТРЦ оголошує про термінову евакуацію всього персоналу та відвідувачів із приміщень ТРЦ через систему оповіщення. У разі отримання сигналу про пожежу всі двері евакуаційних виходів розблоковувалися автоматично. Персонал мав врахувати обставини, що склалися, і визначити найбезпечніші евакуаційні шляхи та виходи до безпечних зон у найкоротший проміжок часу. Схеми евакуації відвідувачів, котрі пересувалися на кріслах колісних з найвіддаленішої точки до пожежобезпечних зон, з яких мала проводитись їх евакуація пожежно-рятувальними підрозділами, наведено на рис. 1.



а) евакуація групи № 1 «Сільпо»



б) евакуація групи № 2 «Свразія»

Рисунок 1 – Схеми евакуації відвідувачів на кріслах колісних з найвіддаленішої точки до пожежобезпечних зон

Джерело: розробка авторів

Відвідувачів, котрі пересуваються лише на кріслах колісних, було поділено на дві групи і розміщено у найвіддаленіших точках від пожежобезпечних зон, до яких вони мали евакуюватися і вже там чекати на пожежно-рятувальні підрозділи для порятунку. Група № 1 була розміщена у найвіддаленішій точці супермаркету «Сільпо», що знаходиться на підвальному поверсі. Група № 2 перебувала у найвіддаленішій точці ресторану «Свразія», розташованого на другому поверсі ТРЦ. Відвідувачі на кріслах колісних перебували на своїх місцях до отримання сигналу про небезпеку, після чого кожна група прямувала до своєї пожежобезпечної зони в холі ліфта для транспортування пожежно-рятувальних підрозділів на відповідному поверсі.

**Формулювання цілей досліджень.** Метою першої частини

проведення експерименту в ТРЦ було визначення залежності швидкості руху людських потоків під час евакуації від перебування в них осіб, які пересуваються на кріслах колісних, їх щільності на різних ділянках шляху та спостереження за початком евакуації відвідувачів і персоналу, що в деяких випадках є одним із основних чинників, які впливають на час евакуації. Другою частиною експерименту було з'ясування часу евакуації людей, які пересуваються на кріслах колісних із пожежобезпечної зони, з якої вони можуть евакуюватися більш тривалий час або знаходитись в ній до прибуття пожежно-рятувальних підрозділів [3]. Це дало змогу дослідити питання евакуації осіб з інвалідністю із пожежобезпечних зон пожежно-рятувальними підрозділами за допомогою пожежних ліфтів в умовах, наближених до реальних.

Про проведення експерименту та його цілі було відомо лише адміністрації ТРЦ, що своєю чергою надало можливість максимально наблизити змодельовану ситуацію до реальної.

**Виклад основного матеріалу досліджень.** ТРЦ, в якому проводився експеримент, обладнано системою оповіщення і управління евакуацією типу СО4, він являє собою триповерхову будівлю і є окремим протипожежним відсіком у складі житлового комплексу. Загальна його площа становить близько 15 000 м<sup>2</sup>, з яких 10 000 м<sup>2</sup> – площа торговельних приміщень.

На підвальному поверсі ТРЦ розташовано супермаркет, який займає близько 3200 м<sup>2</sup>, та ще ряд інших невеличких торговельних площ.

Один із закладів мережі швидкого харчування розмістився на двох рівнях ТРЦ та зайняв площу 440 м<sup>2</sup> на 150 посадкових місць.

Для підрахунку кількості людей, які перебували в ТРЦ, було використано отримані під час експерименту дані (відеоматеріали, опитування спостерігачів експерименту), згідно з якими встановлено, що загальна кількість присутніх, які знаходились в ТРЦ під час експерименту, становила 639 осіб, кількість персоналу – 186, кількість відвідувачів – 453 людини. Більшість відвідувачів склали жінки, близько третини – чоловіки. Здебільшого вік людей варіювався в межах від 18 до 60 років. Приблизно 60–70% відвідувачів були розосереджені між продуктовими відділами в супермаркеті на підвальному поверсі, інші перебували у магазинах одягу та побутової техніки, що розташовувалися на першому і другому поверхах.

За допомогою отриманих відеоматеріалів встановлено, що сигнал тривоги по-різному вплинув на відвідувачів ТРЦ. У момент тривоги більшість відвідувачів була залучена в процес розглядання та вибору товарів. Найменшого впливу від сигналу зазнали покупці, які вже розраховувалися за товар,

стояли в черзі або тільки заходили в супермаркет. Найбільше сигнал привернув увагу людей, які лише обирали товари.

Варто зауважити, що оповіщення про евакуацію було чутно не всім відвідувачам, які перебували на території ТРЦ, і частина із них почала евакуацію лише після вказівок персоналу. Це свідчить, що персонал реагував на сигнал пожежної небезпеки значно швидше та відповідальніше, ніж відвідувачі.

У разі спрацювання системи оповіщення про пожежу відвідувачі починали оглядатися на всі боки в пошуках, ймовірно, причини спрацювання сигналізації, починали коментувати та обговорювати між собою ситуацію для підтвердження сигналу тривоги. Після цього основна кількість відвідувачів, не виявивши ознак пожежі, почали ігнорувати сигнал, вважаючи, що він хибний. Лише декілька із них зреагували миттєво і одразу почали прямувати до евакуаційних виходів, уточнюючи свій шлях у персоналу, не звертаючи увагу на світлові покажчики евакуаційних виходів.

Надалі дії та вказівки персоналу, сигнал тривоги, що постійно лунає, рух людей до виходів переконували відвідувачів у необхідності зреагувати на ситуацію і змушували їх евакуйовуватися. Фактором, який безпосередньо впливав на поведінку відвідувачів, був вплив на них з боку персоналу, а саме – служби безпеки ТРЦ. Як тільки співробітники служби безпеки давали вказівку залишити приміщення у зв'язку із загрозою, відвідувачі починали виходити з приміщень.

Найбільш відчутною залежність поведінки відвідувачів була там, де відбувалося безпосереднє спілкування між персоналом та відвідувачами, а саме – відвідувачі не починали евакуацію доти, доки їх не починав просити про це персонал.

Також встановлено, що загальний час евакуації відвідувачів без особливих потреб та персоналу склав 10,61 хв.

Для фіксації параметрів руху людей ділянками комунікаційних шляхів до

початку відеознімання на досліджуваній ділянці збиралася і встановлювалася масштабна сітка з розміром осередків 1×1 м. Потім знімався контрольний кадр, що фіксує геометричні розміри ділянки та масштабну сітку з урахуванням перспективних спотворень. Після цього сітка прибиралася і виконувалася відеозйомка руху людського потоку [17].

На підставі отриманих відеозаписів було встановлено, що щільність руху людських потоків на шляхах евакуації не перевищувала значення  $D = 1$  люд/м<sup>2</sup>.

Протягом всього часу свого пересування відвідувачі на кріслах колісних перетиналися з людьми, які не

мають обмежень щодо мобільності, у такий спосіб утворюючи змішані потоки людей різної мобільності.

У процесі спостереження також відзначалось, що персонал усіляко намагався допомогти відвідувачам на кріслах колісних (відчинення дверей, допомога під час поворотів тощо), що своєю чергою дещо спрощувало їх пересування.

Отримані дані руху евакуації відвідувачів, котрі пересувалися на кріслах колісних з найвіддаленішої точки до пожежобезпечних зон, з яких проводилась евакуація, наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Дані, отримані під час руху відвідувачів на кріслах колісних

Група	Відстань (м)	Час (хв)	Швидкість (м/хв)
Група №1 «Сільпо»	122,31	2,38	51,39
Група №2 «Євразія»	80,25	2,01	39,93

Джерело: розробка авторів

Після того, як групи відвідувачів на кріслах колісних опинилися в пожежобезпечних зонах, вони залишалися там до моменту прибуття пожежно-рятувальних підрозділів.

Після прибуття рятувальники увімкнули режим «транспортування пожежних підрозділів» за допомогою спеціального ключа. Керування ліфтом здійснювали тільки з кабіни, що давало змогу зупиняти ліфт з панелі керування кабіни на необхідних поверхах, з яких проводилась евакуація людей з пожежобезпечних зон.

У зв'язку з тим, що евакуації потребували дві групи відвідувачів, старший підрозділу, відрядженого для її проведення, ухвалив рішення поділити підрозділ також на дві групи – по дві особи. Спочатку група рятувальників була направлена до місця розташування групи № 2 «Євразія», а друга група рятувальників – до місця розташування групи № 1 «Сільпо» і одразу розпочала евакуацію, розмістивши відвідувачів у

кабіні ліфта і доставивши їх у пожежобезпечну зону, розташовану на першому поверсі, з якої вже відвідувачі на кріслах колісних вивозились безпосередньо за межі будівлі. Через те, що у розпорядженні рятувальників був лише один пожежний ліфт, група № 2 «Євразія» разом із рятувальниками була змушена чекати доти, доки евакуацію не завершить група № 1 «Сільпо», що своєю чергою призвело до затримки евакуації групи № 2 «Євразія», час затримки склав 1,85 хв. Час евакуації відвідувачів, які пересувалися на кріслах колісних з пожежобезпечних зон назовні склав 5,55 хвилин.

Загальний час евакуації відвідувачів, які пересувались на кріслах колісних, в який входить час прямування до пожежобезпечної зони, час очікування на пожежно-рятувальні підрозділи та евакуація, склав 9,81 хвилин.

Отримані дані часу евакуації з пожежобезпечних зон наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Дані, отримані під час евакуації відвідувачів на кріслах колісних

Група	Час прямування пожежно-рятувального підрозділу до групи (хв)	Час розміщення відвідувачів у ліфті (с)	Час евакуації з пожежобезпечної зони до виходу з будівлі (хв)
Група №1 «Сільпо»	1,48	13,2	1,58
Група №2 «Євразія»	1,98	17,6	4,28

Джерело: розробка авторів

Для порівняння за допомогою спрощеної аналітичної моделі [18] було проведено розрахунок часу евакуації з будівлі ТРЦ.

На підставі вихідних даних та за результатами розрахунків розрахунковий час евакуації людей з ТРЦ від

найвіддаленішого місця їх перебування до виходу назовні, з урахуванням часу початку евакуації людей (60 с) відповідно до [18], складає 7,97 хвилин.

Дані щодо експериментального та розрахункового часу евакуації людей з ТРЦ наведено в табл. 4.

Таблиця 4 – Експериментальний та розрахунковий час евакуації людей з торговельно-розважального центру

Час евакуації	Час евакуації (хв)
Розрахунковий час евакуації людей	7,97
Експериментальний час евакуації відвідувачів та персоналу (група М1)	10,61
Експериментальний час евакуації відвідувачів на кріслах колісних з пожежобезпечних зон (група М4)	5,55
Загальний експериментальний час евакуації відвідувачів на кріслах колісних (група М4)	9,81

Джерело: розробка авторів

**Висновки та напрями подальших досліджень.** Згідно з отриманими даними було встановлено, що загальна кількість людей які перебували в ТРЦ під час експерименту, становила 639 осіб, кількість персоналу – 186, кількість відвідувачів – 453 людини. Більшість відвідувачів складали жінки, близько третини – чоловіки. Здебільшого вік людей варіювався в межах від 18 до 60 років. Було встановлено, що розподіл відвідувачів на території ТРЦ був нерівномірним. Найбільша кількість людей була в продуктових відділах і відділах жіночого одягу. На поведінку більшої частини людей (60–70%) сигнал про небезпеку не вплинув або вплинув незначною мірою. Найбільш ефективно вплинув на початок евакуації персонал ТРЦ. Більшість відвідувачів обрали найближчий вихід для евакуації. Під час вибору напрямку руху відвідувачі не

розрізняли виходи за призначенням (евакуаційний або звичайний).

Загальний час евакуації з будівлі склав 10,61 хв. Більша частина загального часу евакуації пішла на те, щоб люди отримали інформацію про пожежу, оцінили ситуацію і вирішили залишити будівлю.

Час евакуації відвідувачів, котрі пересувались на кріслах колісних з пожежобезпечних зон за допомогою пожежно-рятувальних підрозділів, склав 5,55 хв. Загальний час евакуації відвідувачів на кріслах колісних, в який входить час прямування до пожежобезпечної зони, час очікування на пожежно-рятувальні підрозділи та евакуації, склав 9,81 хвилин.

Наявність великої кількості розмежованих виходів, широких комунікаційних шляхів дало змогу уникнути високої щільності людських



потоків на шляхах евакуації і не перевищувати значення 1 люд/м<sup>2</sup>.

Після порівняння та аналізу відеоматеріалів встановлено, що евакуацію відвідувачів, які пересувались на кріслах колісних і які, не вагаючись, почали прямувати до пожежобезпечних зон одразу після спрацювання сигналу про пожежну небезпеку, було завершено раніше, аніж закінчилася евакуація відвідувачів без особливих потреб.

З огляду на отримані дані можна припустити, що таке ставлення

відвідувачів до сигналів про пожежу є небезпечним і в реальній ситуації може призвести до трагічних наслідків.

Аналіз евакуації людей з ТРЦ дав змогу зробити висновок, що одним із вирішальних факторів, які впливають на процес евакуації людей, є грамотні дії персоналу.

Також за допомогою проведеного експерименту було відпрацьовано дії персоналу в умовах пожежі.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Hall J. Patient Evacuation in Hospitals. *Fires and Human Behaviour*. 1980. Volume 3. P. 41–46.
- Bryan J. L., Milke J. A. The Determination of Behavioral Response Patterns in Fire Situations. Project People II. Final Report – Health Care Report. Washington, DC : Centre for Fire Research, National Bureau of Standards, 1981. 142 p.
- Інклюзивність будівель і споруд : ДБН В.2.2-40:2018 [Чинний з 2019-04-01]. Київ: Мінрегіон України, 2017. 70 с.
- Bryan J. L. Human Behaviour in Fire: The Development and Maturity of a Scholarly Study Area. *Proceedings First International Symposium Human Behaviour in Fire*. University of Ulster. Ireland. 1998. P. 3–12.
- Pauls J. A. Personal Perspective on Research, Consulting and Codes/Standards Development in Fire - Related Human Behaviour, 1969–1997 with an Emphasis on Space and Time Factors. *Proceedings First international Symposium Human Behaviour in Fire*. University of Ulster. Ireland. 1998. P. 71–82.
- Pauls J. L., Jones, B. K. Research in Human Behaviour. *Fire Journal*, V. 74. № 3. 1980. P. 35–41.
- Shields T. J., Dunlop K. E., Silcock G. W. H. Escape of Disabled People from Fire: A Measurement and Classification of Capability for Assessing Escape Risk, Building Research Establishment. Ireland: University of Ulster, 1996. 171 p.
- Fahy R., Proulx G. Human Behaviour in the World Trade Centre Evacuation. *Fire Safety Science – Proceedings of the Fifth International Symposium*. Melbourne, Australia, 1997. P. 713–724.
- Proulx G., Fahy R. The Time Delay to Start Evacuation : Review of Five Case Studies. *Proceedings of the Fifth International Symposium on Fire Safety Science*. Melbourne, Australia, 1997. P.783–794.
- Saunders W. L. Occupant Decision Making in Office Building Fire Emergencies. *Proceedings of the Fifth International Symposium on Fire Safety Science*. Melbourne, Australia, 1997. P.771–782.
- Proceedings of the First International Symposium Human Behaviour in Fire: T. J. Shields (Ed). Ireland : University of Ulster, 1998. 114 p.
- Sime J. D. Escape Behaviour in Fires Design Against Fire: An Introduction to Fire Safety Engineering Design. London : Chapman Hall, 1994. 172 p.
- 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. *Вісник «Пожежна безпека»*. 2020. № 37. С. 72–76.
- Kovalyshyn V. V., Khlevnoy O. V., Kharyshyn D. V. Primary school-aged children evacuation from secondary education institutions with inclusive classes. *Sciences of Europe*. Praha, 2020. Vol 60. 53–56 p.
- Ковалишин В. В., Хлевной О. В. Визначення площі горизонтальної проекції дітей шкільного віку. *Науковий вісник: цивільний захист і пожежна безпека*. 2020. № 2. С. 54–60.
- Хлевной О. В. Нормування вимог пожежної безпеки до евакуаційних шляхів і виходів у закладах середньої освіти з інклюзивним навчанням : дис. канд. техн. наук: 21.06.02 / Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 2021. 188 арк.
- Самошин Д. А. Состав людских потоков и параметры их движения при эвакуации : монография. М. : Академия ГПС МЧС России, 2016. 210 с.
- Пожежна безпека. Загальні положення : ДСТУ 8828:2019 [Чинний з 2020-01-01]. Київ : УкрНДНЦ, 2018. 163 с.

### REFERENCES

- Hall, J. (1980). Patient Evacuation in Hospitals. *Fires and Human Behaviour*, Volume 3. 41–46. [in English].
- Bryan, J. L., Milke J.A. (1981). *The Determination of Behavioral Response Patterns in Fire Situations. Project People II. Final Report – Health Care Report*. Washington, DC: Centre for Fire Research, National Bureau of Standards [in English].
- Inklyuzyvnyts' budivvel' i sporud [Inclusiveness of buildings and structures] (2017). DBN V.2.2-40:2018 from 1<sup>st</sup> april 2019. Kyiv: Minregion Ukraine [in Ukrainian].
- Bryan, J. L. (1998). Human Behaviour in Fire: The Development and Maturity of a Scholarly Study Area. *Proceedings First International Symposium Human Behaviour in Fire*. University of Ulster. Ireland [in English].
- Pauls, J. A. (1998). Personal Perspective on Research, Consulting and Codes/Standards Development in Fire - Related Human Behaviour, 1969-1997 with an Emphasis on Space and Time Factors. *Proceedings First international Symposium Human Behaviour in Fire*. University of Ulster. Ireland [in English].
- Pauls, J. L., Jones, B. K. (1980). Research in Human Behaviour. *Fire Journal*, 74, (3), 35 – 41 [in English].
- Shields, T. J., Dunlop, K. E., Silcock, G. W. H. (1996). Escape of Disabled People from Fire: A Measurement and Classification of Capability for Assessing Escape Risk, Building Research Establishment. Ireland: University of Ulster [in English].

8. Fahy, R., Proulx, G. (1997). Human Behaviour in the World Trade Centre Evacuation. *Fire Safety Science - Proceedings of the Fifth International Symposium*. Melbourne, Australia [in English].
9. Proulx, G., Fahy, R. (1997). The Time Delay to Start Evacuation: Review of Five Case Studies. *Proceedings of the Fifth International Symposium on Fire Safety Science*. Melbourne, Australia [in English].
10. Saunders, W. L. (1997). Occupant Decision Making in Office Building Fire Emergencies. *Proceedings of the Fifth International Symposium on Fire Safety Science*. Melbourne, Australia [in English].
11. Shields, T. J. (Ed). (1998). Proceedings of the First International Symposium Human Behaviour in Fire. Ireland: University of Ulster [in English].
12. Sime, J. D. (1994). Escape Behaviour in Fires Design Against Fire: An Introduction to Fire Safety Engineering Design. London: Chapman Hall [in English].
13. Khlevnoy, O. V., Kharyshyn, D. V., Nazarovets', O. B. (2020). Problemni pytannya rozrakhunku chasu evakuatsiyi pry pozhezhakh u zakladakh doshkil'noyi ta seredn'oyi osvity z inklyuzyvnymy hrupamy [Problematic issues of calculation of evacuation time in case of fires in preschool and secondary education institutions with inclusive groups]. *Visnyk «Pozhezhna bezpeka»*, 37, 72–76. doi : 10.32447/20786662.37.2020.11 [in Ukrainian].
14. Kovalyshyn, V. V., Khlevnoy, O. V., Kharyshyn, D. V. (2020). Primary school-aged children evacuation from secondary education institutions with inclusive classes. *Sciences of Europe*, 60, 53–56. doi: 10.24412/3162-2364-2020-60-1-53-56 [in English].
15. Kovalyshyn, V. V., Khlevnoy, O. V. (2020). Vyznachennya ploshchi horizontal'noyi proektsiyi ditey shkil'noho viku. [Determining the area of the horizontal projection of school-aged children]. *Naukovyy visnyk: tsyvil'nyy zakhyst i pozhezhna bezpeka*, 2, 54-60. doi: 10.33269/nvcz.2020.2.54-60 [in Ukrainian].
16. Khlevnoy, O. V. (2021). *Normuvannya vymoh pozhezhnoyi bezpeky do evakuatsiynykh shlyakhiv i vykhodiv u zakladakh seredn'oyi osvity z inklyuzyvnym navchannym* [Standardization of fire safety requirements for evacuation routes and exits in school institutions with inclusive education]. (Candidate thesis). Lviv State University of Life Safety. Lviv [in Ukrainian].
17. Samoshin, D. A. (2016). Sostav lyudskikh potokov i parametry ikh dvizheniya pri evakuatsii [The composition of human flows and the parameters of their movement during evacuation]. Monografiya. Moskva: Akademiya GPS MCHS Rossii [in Russian].
18. Pozhezhna bezpeka. Zahal'ni polozhennya [Fire Security. Terms]. (2018). DSTU 8828:2019 from 1<sup>st</sup> January 2020. Kyiv: DP «UkrNDNC» [in Ukrainian].

## RESEARCH OF THE EVACUATION OF PEOPLE OF DIFFERENT MOBILITY GROUPS FROM A SHOPPING AND ENTERTAINMENT CENTER

V. Kovalyshyn<sup>1</sup>, O. Dotsenko<sup>2</sup>, O. Khlevnoy<sup>1</sup> V. Dyven<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Lviv State University of Life Safety, Ukraine

<sup>2</sup> Institute of Public Administration and Research in Civil Protection, Ukraine

<sup>3</sup> Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes National University of Civil Defence of Ukraine, Ukraine

### KEYWORDS:

shopping and entertainment center, low-mobility population groups, people with disabilities, evacuation, rescuing people, people's behavior during a fire, inclusiveness, fire safety zone, fire and rescue units, evacuation using fire elevators, staff behavior during a fire, fire in a shopping and entertainment center center, visitors in wheelchairs

### ANNOTATION

The conducted studies are devoted to determining the dependence of the speed of movement of human flows during evacuation on the presence of people in wheelchairs, their density on different sections of the road, and observing the beginning of the evacuation of visitors and staff, which in some cases is one of the main factors affecting evacuation time. The work investigated a situation as close as possible to reality - an unannounced evacuation, when neither the staff nor the visitors knew about its educational goals. Video cameras recorded the behavior of people and the movement of human flows from the moment the notification system was activated until the moment they left the building and completed the evacuation of people from fire-safe zones by fire and rescue units. Data were obtained on the evacuation of visitors who moved in wheelchairs from the farthest point to the fire-safe zones from which the evacuation was carried out. The total evacuation time of visitors who were in wheelchairs was established, which includes the time of going to the fire safety zone, the time of waiting for the fire and rescue units and evacuation from the fire safety zones. The time of evacuation of people in wheelchairs from fire-safe zones, from which they can evacuate for a longer time or be in them before the arrival of fire and rescue units, has been established. Data were obtained on the evacuation of persons who move only in wheelchairs from fire-safe zones by fire-rescue units using fire elevators in conditions close to real ones. The experiment helped to obtain results regarding the dependence of the speed of movement of human flows during evacuation on the presence of disabled people in wheelchairs and their density on different sections of the road, and to determine the time of evacuation of people in wheelchairs from fire-safe zones. The process of evacuation from the shopping and entertainment center in general. The work carried out made it possible to understand the process of evacuation and rescue of people from this object. With the help of the conducted experiment, the evacuation plan from the building was worked out and adjusted, the skills and abilities of the staff to behave in extreme situations were improved and practiced, visitors were prepared for possible emergency situations that may occur in everyday life.

УДК 351.861

## МЕТОДИКА ОБҐРУНТУВАННЯ ОПЕРАТИВНО-ТЕХНІЧНИХ РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО СКОРОЧЕННЯ ЧАСУ ПІДВОДНОГО РОЗМІНУВАННЯ ВОДОЛАЗАМИ-САПЕРАМИ ДЕРЖАВНОЇ СЛУЖБИ УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2.108-121>

Соловійов І. І.<sup>1\*</sup>, ORCID iD 0000-0002-0400-6704  
Стрілець В. М.<sup>2</sup>, ORCID iD 0000-0001-5992-1195  
Бляшенко О. В.<sup>3</sup>, ORCID iD 0000-0003-1500-0487  
Серватюк В. М.<sup>4</sup>, ORCID iD 0000-0002-6444-1425  
Прусський А. В.<sup>5</sup>, ORCID iD 0000-0002-9132-7070

\*E-mail: vstrelec1956@ukr.net

<sup>1</sup>Аварійно-рятувальний загон спеціального призначення Головного управління ДСНС України у Херсонській області, Україна

<sup>2</sup>Національний університет цивільного захисту України, Україна

<sup>3</sup>Міністерство оборони України, Україна

<sup>4</sup>Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, Інститут державного військового управління, Україна

<sup>5</sup>Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Україна

### ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 09.11.2022

Пройшла рецензування: 14.11.2022

### КЛЮЧОВІ СЛОВА:

підводне розмінування, водолаз-сапер, експертні оцінки, багатофакторна модель, методика

### АНОТАЦІЯ

Згідно з аналізом важливою та нерозв'язаною частиною проблеми підвищення ефективності попередження надзвичайних ситуацій, пов'язаних із підводним розташуванням вибухонебезпечних предметів, є відсутність методики обґрунтування оперативно-технічних рекомендацій щодо скорочення часу підводного розмінування водолазами-саперами ДСНС України без зниження рівня безпеки особового складу. Застосування системного ергономічного аналізу для представлення діяльності водолаза-сапера у вигляді функціонування системи «водолаз-сапер – технічне забезпечення підводного розмінування – підводне розташування вибухонебезпечного предмета», статистичних методів планування експериментальних досліджень та обробки отриманих результатів, а також математико-статистичних методів безпосередніх експертних оцінок дало змогу розробити методику, основу якої складає багатофакторна математична модель підводного розмінування водолазами-саперами ДСНС України. Методика являє собою сукупність таких послідовних дій: вибір варіантів оперативної діяльності (виділені такі значущі фактори, як рівень підготовленості водолаза-сапера; умови підводного середовища, в яких працює особовий склад; рівень їх оснащеності); безпосередня експертна оцінка часу виконання вибраних варіантів відповідно до плану 3x3x2 з урахуванням узгодженості експертів; визначення параметрів моделей підводного розмінування за допомогою стандартних формул теорії планування експериментів та перевірка їх достовірності через порівняння того, наскільки натурні результати, отримані в умовах, які відповідають конкретній комбінації вибраних факторів, укладаються в довірчі інтервали, що розраховані з надійністю 0,95 за результатами застосування багатофакторних математичних моделей підводного розмінування з конкретними параметрами; аналіз та спрощення моделей з подальшим ранжуванням факторів як в центрі факторного простору, так і на його краях; обґрунтування рекомендацій, які мають оперативно-технічний характер, оскільки вибрані фактори характеризували як оперативну (роботу особового складу в умовах впливу навколишнього середовища), так і технічну складові процесу підводного розмінування та їх упродовження.

**Постановка проблеми.** Проблема розмінування водних акваторій є надзвичайно важливою в усьому світі, оскільки на сьогодні близько 15% із 70 мільйонів мін, які потребують свого розмінування, встановлені на мілководних ділянках внутрішніх водоймищ [1]. У нашій країні її актуальність посилюється як значною кількістю залишків вибухонебезпечних предметів Другої світової війни у водах Чорного та Азовського морів [2], так і наслідками агресії росії.

Щодо ліквідації надзвичайних ситуацій (далі – НС), пов'язаних із вибухонебезпечними предметами, що знаходяться на суходолі, накопичено значний досвід [3]. Проте подальших досліджень потребують питання підвищення ефективності попередження надзвичайних ситуацій, пов'язаних із підводним розташуванням вибухонебезпечних предметів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У документах Балтійської ради з безпеки боєприпасів [4], які спільно із США були конкретизовані в Міжнародному стандарті IMAS 09.60 «Підводна розвідка та знешкодження вибухових речовин» [5] підкреслено особливу роль водолазів-саперів. Водночас питання підвищення ефективності їх діяльності з урахуванням факторів, які характеризують людину, водне середовище, а також технічні засоби забезпечення підводного розмінування, не розглядалися. Не розглядалися вони і в Стандартній оперативній процедурі гуманітарного підводного розмінування [6], де основна увага приділяється підготовці особового складу.

У більшості публікацій, зокрема у [7], розглядаються конкретні випадки та надається їх аналіз, або аналізуються результати обстеження конкретних підводних об'єктів [8–10], проблеми підвищення інформування піротехнічних підрозділів [11], оцінюється можливий ризик [12]. Окремо виділяються питання, що пов'язані із підготовкою та здоров'ям водолазів-саперів [13–15].

Хоча сучасною перспективною попередження НС, пов'язаних із підводним розташуванням вибухонебезпечних предметів, є застосування принципів «не підривати» [16] та перехід на реалізацію можливостей підводних роботів [17], проте без участі спеціально підготовлених водолазів-саперів [18] не обійтись. Організація їх діяльності потребує урахування як можливостей особового складу, так і умов, у яких вони будуть виконувати поставлені завдання, а також тактико-технічних характеристик обладнання, яке є на озброєнні у відділеннях підводного розмінування груп піротехнічних робіт і спеціальних водолазних робіт Аварійно-рятувальних загонів спеціального призначення ДСНС України.

Водночас конкретні розробки, наприклад [19], в яких проаналізовано управління проектами потенційно небезпечних підводних об'єктів у складі технічних, технологічних, організаційних та економічних інформаційних платформ, або [20], в яких розглядаються датчики ідентифікації морських мін, обмежуються розв'язанням вузьких задач. Хоча під час обговорення проблем підводного розмінування [21] особливо наголошують на їхньому комплексному характері.

У дослідженнях щодо попередження та ліквідації НС на суходолі розглядали цей процес різнобічно, але їх важко безпосередньо використати для вдосконалення робіт із підводного розмінування. Так, у [22–23] їх вивчали з погляду розвитку НС; у [24–25] – з позицій організації робіт з ліквідації НС; у [26–27] – з позицій загальної теорії профілактики. Проте у всіх цих випадках вони не розглядали процес ліквідації НС, що пов'язані із підводним розташуванням вибухонебезпечних предметів (далі – ПНС), із позицій забезпечення якості функціонування системи «ПНС – спеціальні засоби підводного розмінування – водолаз-сапер». Водночас відповідно до методології імітаційного моделювання [28] обґрунтування пропозицій щодо підвищення

ефективності таких складних систем має спиратись на закономірності їх функціонування загалом.

Стосовно підводного розмінування водолазом-сапером визначити такі закономірності можна за результатами аналізу відповідної математичної моделі. У [29] показано що в загальному вигляді вона являє собою систему із трьох аналітичних залежностей. Перша являє собою функціонал, який описує процес підводного розмінування як трифакторну поліноміальну модель. Наявність поліноміальної моделі дає змогу врахувати нелінійний вплив обраних факторів, а також їх зв'язок між собою на ефективність проведення підводного розмінування. Друга надає можливість уявити цей функціонал як сукупність однофакторних моделей. Третя забезпечує визначення вагових коефіцієнтів у разі розв'язання багатфакторного завдання. Проте обґрунтування оперативно-технічних рекомендацій спеціалізованим відділенням підводного розмінування групи піротехнічних робіт та спеціальних водолазних робіт на їх основі не проводилось.

Таким чином, важливою та нерозв'язаною частиною проблеми підвищення ефективності попередження надзвичайних ситуацій, пов'язаних з підводним розташуванням вибухонебезпечних предметів, є відсутність методики обґрунтування оперативно-технічних рекомендацій щодо скорочення часу підводного розмінування водолазами-саперами ДСНС України без зниження рівня безпеки особового складу.

**Формулювання цілей дослідження.** Метою статті є розроблення методики обґрунтування оперативно-технічних рекомендацій щодо скорочення часу підводного розмінування водолазами-саперами.

Для досягнення поставленої мети потребують розв'язання такі завдання:

- вибір керувального алгоритму, який реалізує математичну модель підводного розмінування в процесі обґрунтування рекомендацій щодо скорочення часу оперативних робіт без зниження рівня безпеки особового складу;
- обґрунтування варіантів оперативної діяльності водолазів-саперів у процесі підводного розмінування;
- експертне отримання вихідних даних та їх оцінка;
- визначення параметрів багатфакторних моделей підводного розмінування та перевірка їх достовірності;
- аналіз та спрощення моделей;
- отримання оперативно-технічних рекомендацій для спеціалізованих піротехнічних підрозділів підводного розмінування та їх вибір для упровадження.

**Методи дослідження.** Застосовано системний ергономічний аналіз діяльності водолаза-сапера як функціонування системи «водолаз-сапер – технічне забезпечення підводного розмінування – підводне розташування вибухонебезпечного предмета», а також статистичні методи планування експериментальних досліджень та обробки отриманих результатів, математико-статистичні методи безпосередніх експертних оцінок.

**Виклад основного матеріалу.** Відповідно до розробленої у [29] математичної моделі (14) керувальний алгоритм реалізації методики обґрунтування оперативно-технічних рекомендацій щодо скорочення часу підводного розмінування водолазами-саперами ДСНС України без зниження рівня підготовленості особового складу наведено на рис. 1.



Рисунок 1 – Схема керувального алгоритму реалізації методики обґрунтування оперативно-технічних рекомендацій щодо скорочення часу підводного розмінування водолазами-саперами

Джерело: розробка авторів

Враховуючи те, що дії водолазів-саперів під час підводного пошуку вибухонебезпечних предметів були докладно досліджені в [7], де підкреслено, що під час цього процесу особлива увага має приділятися питанням загальної організації робіт щодо розмінування та залученню новітніх технічних засобів їх пошуку. Основними процесами, які потребують отримання рекомендацій щодо скорочення часу підводного розмінування безпосередньо водолазами-саперами, є підіймання вибухонебезпечних предметів з глибини та, якщо це зробити неможливо, – їх підводний підрив.

З урахуванням того, що на процес підводного розмінування впливають вихідні показники, які характеризують множини  $X_{ВС}$  (характеризують безпосередньо водолазів-саперів),  $X_{НС}$  (характеризують надзвичайну ситуацію та умови проведення підводного розмінування) та  $X_{ТЗ}$  (характеризують сукупність технічних засобів забезпечення підводного розмінування), а також результатів аналізу особливостей проведення підводного розмінування [30],

можна виділити такі важливі фактори, які визначають процес підводного розмінування, як системи:  $x_1$  – рівень підготовленості водолаза-сапера;  $x_2$  – умови, в яких працює особовий склад;  $x_3$  – рівень оснащеності.

Аналіз відібраних факторів та результати експериментальних досліджень [30] показують, що рівень  $x_1$  підготовленості водолазів-саперів впливає на час підводного розмінування нелінійно. Так, підвищення рівня практичної виучки особового складу буде сильніше впливати на час підводного розмінування під час переходу від початкового рівня підготовленості ( $x_1=-1$ ) до фахового ( $x_1=0$ ), ніж від фахового до високофахового ( $x_1=+1$ ). Останній відповідає рівню водолазів-саперів, які мають 1 клас або є майстрами своєї справи.

Аналогічно можна стверджувати й про три рівні умов, в яких проводиться підводне розмінування. Гарним ( $x_2=+1$ ) відповідають гарна видимість, відсутність течії та глибина до 3 м. Звичайним ( $x_2=0$ ) – обмежена видимість на відстані понад 3 м,

незначна течія та глибина від 3 до 6 м, а поганим ( $x_2=-1$ ) – обмежена видимість на відстані менше 3 м, значна течія та глибина понад 6 м. Стосовно рівня оснащення в

нашому випадку на сьогодні можна стверджувати про два рівні: використання сухого та мокрого гідрокостюмів.

З урахуванням переходу вибраного показника ефективності (часу підймання вибухонебезпечного предмета Т) до нормованого вигляду

$$y = \frac{t - t_{\min}}{t_{\max} - t_{\min}}, \quad (1)$$

де  $t_{\max}$  – час підймання вибухонебезпечного предмета водолазом-підводником початкового рівня підготовленості ( $x_1=-1$ ) в поганих умовах ( $x_2=-1$ ) з використанням сухого гідрокостюма ( $x_3 = -1$ ), с;  $t_{\min}$  – час підймання вибухонебезпечного предмета водолазом-підводником високофахового рівня підготовленості ( $x_1=+1$ ) в гарних умовах ( $x_2=+1$ ) з використанням мокрого гідрокостюма ( $x_3 = +1$ ), с.

Трифакторна поліноміальна модель [36]:

$$t = a_0 + a_1 X_{BC} + a_2 X_C + a_3 X_{CЗПР} + a_{11} X_{BC}^2 + a_{22} X_C^2 + a_{12} X_{BC} X_C + a_{13} X_{BC} X_{CЗПР} + a_{23} X_C X_{CЗПР}, \quad (2)$$

трансформується в трифакторну поліноміальну модель виду

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3. \quad (3)$$

Тобто для отримання багатфакторної моделі підводного розмінування доцільно провести багатфакторний експеримент відповідно до плану 3х3х2. Оскільки статистично значущі вихідні дані за результатами натурних експериментів отримати практично неможливо, ухвалено рішення щодо експертної оцінки вибраних варіантів оперативної діяльності водолазів-саперів за вибраним планом.

У цьому разі необхідно визначити

найбільш ймовірний  $\tilde{t}_j$ , мінімальний  $t_{j \min}$  та максимальний  $t_{j \max}$  часу виконання j-того процесу. Для їх визначення кожний і-тий експерт надає відповідні індивідуальні оцінки виконання і-тої операції  $\langle t_{ij \min}, \tilde{t}_{ij}, t_{ij \max} \rangle$ . Це дає змогу усереднене очікуване значення  $\tilde{t}_j$  розглядати як середньовиважену оцінку за спостереженнями всіх n експертів [31]:

$$\tilde{t}_i = \sum_{j=1}^n V_{ij}(\tilde{t}_j) \tilde{t}_{ij}, \quad (4)$$

де  $v_j(\tilde{t}_j)$  – ваговий коефіцієнт j-го експерта за оцінки  $\tilde{t}_j$ , який розраховується як

$$V_{ij}(\tilde{t}_j) = \frac{1}{(\tilde{t}_{ij} - \tilde{t}_j)^2 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{(\tilde{t}_{ij} - \tilde{t}_j)^2}}, \quad \text{де } \bar{\tilde{t}}_i = \frac{\sum_{i=1}^n \tilde{t}_{ij}}{n}. \quad (5)$$

За (4) та (5) аналогічним чином розраховуються  $t_{i \min}$  та  $t_{i \max}$ .

Після того як будуть виключені аномальні значення оцінок, що задовольняють нерівності

$$|\tilde{t}_{ij} - \bar{t}_i| \geq a \cdot \sigma_i(\tilde{t}_i), \quad (6)$$

$$\text{де } a = 2,5 \div 3,0; \sigma_i(\tilde{t}_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{j=1}^n (\tilde{t}_{ij} - \bar{t}_i)^2};$$

та у разі потреби повторного розрахунку  $\tilde{t}_i$ ,  $t_{i \min}$  та  $t_{i \max}$  можна визначити як параметри нормального розподілу, і в цьому разі найбільш імовірна оцінка часу виконання і-тої операції  $\tilde{t}_i$  розглядається як її математичне очікування  $\bar{t}_i$ , а середньоквадратичне відхилення як

$$\sigma_i \approx \frac{t_{i \max} - t_{i \min}}{6}, \quad (7)$$

так і параметри  $\beta$ -розподілу часу виконання і-тої комбінації обраних факторів під час підймання вибухонебезпечного предмета.

Для цього використовуються характеристики  $\beta$ -розподілу з параметрами  $\alpha > 1$  та  $\beta > 1$ , оскільки [32] в кодованих змінних оцінка найбільш вірогідного часу виконання і-тої операції дорівнює

$$\tilde{x}_i = \frac{\tilde{t}_i - t_{i \min}}{t_{i \max} - t_{i \min}} = \frac{\alpha_i - 1}{\alpha_i + \beta_i - 2}, \quad (8)$$

а дисперсія цієї оцінки

$$\sigma^2(x_i) = \frac{\alpha_i \cdot \beta_i}{(\alpha_i + \beta_i)^2 \cdot (\alpha_i + \beta_i + 1)}. \quad (9)$$

З урахуванням переходу від кодованих змінних до натуральних експертна оцінка математичного очікування часу виконання і-тої комбінації обраних факторів під час підймання вибухонебезпечного предмета

$$\bar{t}_i = t_{i \min} + \frac{\alpha_i}{\alpha_i + \beta_i} \cdot (t_{i \max} - t_{i \min}). \quad (10)$$

Проте групова оцінка вважається достатньо надійною тільки за умови доброї узгодженості залучених фахівців [32]. З огляду на це статистичній обробці інформації, яка отримана від експертів, має передувати оцінка ступеня їх узгодженості.

За аналогією з [33] для цього може використовуватись показник скошеності (5) розподілу часу виконання процесу та мода, в якості якої використовується найбільш ймовірний час виконання цієї операції (6), оскільки можуть мати місце випадки, коли оцінки найбільш імовірного часу виконання процесу в окремих експертів різко відрізняються від таких же оцінок інших фахівців. Унаслідок цього щодо кожного і-го процесу необхідно перевіряти узгодженість думок експертів щодо того, в якому місці інтервалу

$[t_{i \min}; t_{i \max}]$  перебуває найбільш імовірний час  $\tilde{t}_i$  його виконання і як це впливає на середній час виконання  $\bar{t}_i$  процесу. Для цього отримані оцінки після кодування (10) доцільно проранжувати за умови розподілення результатів за трьома рангами ( $m=3$ ) таким чином: якщо  $\tilde{x}_i < 0,5$ , то результати, що мають менший час, отримують ранг  $v_1=1$ ; результати поблизу середини діапазону –  $v_2=2$ , а результати в другій половині діапазону –  $v_2=3$ . В іншому випадку ( $\tilde{x}_i > 0,5$ ):  $v_1=3$ ;  $v_2=2$ ;  $v_3=1$ . Коли ж експерт не може визначити та встановити оцінку в середині діапазону ( $\tilde{x}_i \approx 0,5$ ), береться  $v_1=v_2=v_3=2$ . Тобто умова ранжування може бути записана як



$$\{v_1, v_2, v_3\} = \begin{cases} \{1, 2, 3\}, & \text{якщо } \bar{x}_j < 0.5; \\ \{3, 2, 1\}, & \text{якщо } \bar{x}_j > 0.5; \\ \{2, 2, 2\}, & \text{якщо } \bar{x}_j \approx 0.5. \end{cases} \quad (11)$$

Крім того, прийнято такі позначення:  $q$  – кількість суперечливих оцінок, тобто тих, в яких відрізняється місце найбільш вірогідного часу виконання операції порівняно з місцем, яке вказує основна група експертів;  $p$  – кількість оцінок, в яких експерти не змогли вказати місце найбільш вірогідного часу виконання

операції (якщо всі експерти як найбільш ймовірний результат вказують середину діапазону, вважаємо  $q=p=0$ ). В такому разі узгодженість думок експертів оцінюється за допомогою коефіцієнта конкордації  $W$  [32], тобто загального коефіцієнта рангової кореляції для групи, що складається з  $n$  експертів.

Для розрахунку значення коефіцієнта конкордації спочатку розраховується сума квадратів різниць (відхилень) за формулою

$$S = \sum_{i=1}^m \left\{ \sum_{j=1}^n v_{ij} - \frac{n}{2} \cdot n \cdot (m+1) \right\}^2, \quad (12)$$

де  $n$  – кількість експертів в групі;  $m$  – кількість можливих показників (у нашому випадку  $m=3$ ).

Тоді сумарне квадратичне відхилення від їх середнього значення для сумарних рангів факторів за найкращої узгодженості (коли всі експерти надають однакові оцінки) має вигляд

$$S_{\max} = \frac{1}{12} \cdot m \cdot n^2 \cdot (m^2 - 1), \quad (13)$$

а оскільки коефіцієнт конкордації розглядається як відношення фактично отриманої величини  $S$  до її максимального значення для групи експертів, яка залучена, то

$$W = \frac{S}{S_{\max}} = \frac{12 \cdot S}{n^2 (m^3 - m)} = \frac{S}{2 \cdot n^2}. \quad (14)$$

Отримане значення коефіцієнта конкордації  $W$  дає змогу оцінити не випадкову узгодженість експертів, використовуючи критерій  $\chi^2$  з відповідним рівнем значущості  $\alpha$ .

Із урахуванням незначної кількості фахівців підводного розмінування в Україні можна використати спрощений вираз, який наведено в [34] щодо визначення розрахункового коефіцієнта конкордації

$$W \geq W_{\text{дон}}(\alpha = 0,05),$$

$$\text{якщо } \begin{cases} p = 0, q = 0 \text{ при } n \geq 4; \\ p = 1, q = 0 \text{ при } n \geq 5; \\ p = 0, q = 1 \text{ при } n \geq 7; \\ p = 1, q = 1 \text{ при } n \geq 8, \end{cases} \quad (15)$$

який свідчить про те, що за рівня значущості  $\alpha=0,05$  не випадкова узгодженість в думках експертів існує як у тих випадках, коли за  $n = 4 \div 8$  всі фахівці однаково вказали діапазон, в якому знаходиться місце найбільш вірогідного часу виконання  $i$ -ої операції, так і в тих, коли має місце одна оцінка без уточнення

місця знаходження  $\tilde{t}_i$  за  $n > 4$  або є одна суперечлива оцінка за  $n > 6$ .

У разі залучення до експертної групи восьми фахівців (а саме така ситуація мала місце в нашому випадку) допускається по одній суперечливій оцінці і одній оцінці без уточнення місця знаходження.

Наявність експертних оцінок часу виконання підводного розмінування за вибраним варіантом відповідно до плану 3x3x2 дає змогу визначити після переходу до нормованого відповідно до (1) подання вихідних даних оцінки параметрів трифакторної поліноміальної моделі (3). В цьому разі можна використовувати [35] готові формули

$$b_0 = A_0(0Y) - \sum A_{0i}(i0Y), \quad (16)$$

$$b_i = A_i(iY), \quad (17)$$

$$b_{ij} = A_{ij}(ijY), \quad (18)$$

$$b_{ii} = A_{ii}(iiY) - A_{0i}(0Y), \quad (19)$$

де  $A_0, A_{0i}, A_i, A_{ij}, A_{ii}$  – постійні для розрахунку коефіцієнтів регресії у разі симетричних планів;  $0Y, iiY, iY, ijY$  – суми результатів експертних оцінок, якщо вони будуть такими, як наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати експертного оцінювання розглянутих відповідно до плану 3x3x2 варіантів підводного розмінування у нормованому вигляді

Варіант розмінування	1	2	3	4	5	6
$x_1$	-1	-1	-1	-1	-1	-1
$x_2$	-1	-1	0	0	1	1
$x_3$	-1	1	-1	1	-1	1
$\tilde{x}$	1,0	$x\{-1,-1,1\}$	$x\{-1,0,-1\}$	$x\{-1,0,1\}$	$x\{-1,1,-1\}$	$x\{-1,1,1\}$
$\sigma$	$\sigma\{-1,-1,-1\}$	$\sigma\{-1,-1,1\}$	$\sigma\{-1,0,-1\}$	$\sigma\{-1,0,1\}$	$\sigma\{-1,1,-1\}$	$\sigma\{-1,1,1\}$
Варіант розмінування	7	8	9	10	11	12
$x_1$	0	0	0	0	0	0
$x_2$	-1	-1	0	0	1	1
$x_3$	-1	1	-1	1	-1	1
$\tilde{x}$	$x\{0,-1,-1\}$	$x\{0,-1,1\}$	$x\{0,0,-1\}$	$x\{0,0,1\}$	$x\{0,1,-1\}$	$x\{0,1,1\}$
$\sigma_{\tilde{x}}$	$\sigma\{0,-1,-1\}$	$\sigma\{0,-1,1\}$	$\sigma\{0,0,-1\}$	$\sigma\{0,0,1\}$	$\sigma\{0,1,-1\}$	$\sigma\{0,1,1\}$
Варіант розмінування	13	14	15	16	17	18
$x_1$	1	1	1	1	1	1
$x_2$	-1	-1	0	0	1	1
$x_3$	-1	1	-1	1	-1	1
$\tilde{x}$	$x\{1,-1,-1\}$	$x\{1,-1,1\}$	$x\{1,0,-1\}$	$x\{1,0,1\}$	$x\{1,1,-1\}$	0
$\sigma_{\tilde{x}}$	$\sigma\{1,-1,-1\}$	$\sigma\{1,-1,1\}$	$\sigma\{1,0,-1\}$	$\sigma\{1,0,1\}$	$\sigma\{1,1,-1\}$	$\sigma\{1,1,1\}$

Джерело: розробка авторів

Перевірка достовірності багатofакторної моделі підводного розмінування водолазами-саперами проводиться через порівняння результатів, отриманих відповідно до (3) після використання (16) – (19), з результатами реального підводного розмінування особовим складом конкретного відділення підводного розмінування групи

піротехнічних робіт та спеціальних водолазних робіт аварійно-рятувального загону спеціального призначення через перевірку укладання натурних результатів в умових, які відповідають конкретній комбінації вибраних факторів, в довірчі інтервали, що розраховані з надійністю 0,95 за результатами експертного оцінювання.

Звісно, перед цим необхідно зробити зворотний перехід

$$t_i\{x_1, x_1, x_3\} = x_i\{x_1, x_1, x_3\} \cdot (t_{i \max} - t_{i \min}) + t_{i \min} \quad (20)$$

Тоді довірчий інтервал визначається як

$$t_i(x_1, x_2, x_3) = \tilde{t}_i \pm 1.96 \cdot \frac{\sigma_i(x_1, x_2, x_3)}{\sqrt{n}}, \quad (21)$$

де  $n$  – кількість експертів, за оцінками яких визначались середньозважені оцінки середнього часу та середньоквадратичного відхилення відповідно до обраної комбінації значущих факторів під час вибраного варіанта підводного розмінування.

Відповідно можуть відрізнитись і пропозиції щодо ефективності проведення підводного розмінування, які будуть отримані для центра факторного простору та для його країв.

Якщо перевірка ряду дисперсій за  $\sigma$ -критерієм Кохрену [36]

$$Kh = \frac{(\sigma_n^2)_{\max}}{\sum_{n=1}^n \sigma_n^2} \leq Kh_{\text{табл}}, \quad (22)$$

де  $(\sigma_n^2)_{\max}$  – максимальна дисперсія в ряду, що розглядається;  $n=18$  – кількість точок вибраного плану  $3 \times 3 \times 2$ ,

підтвердить правдоподібність такої гіпотези, то під час подальшого аналізу можна користуватись середньою нормованою дисперсією отриманих експертних оцінок

$$\sigma_{\bar{x}}^2 = \frac{1}{18} \cdot \sum_{n=1}^{18} \sigma_n^2. \quad (23)$$

У разі потрапляння натурних результатів у довірчий інтервал (21) можна перейти до аналізу математичної моделі (3). Водночас необхідно враховувати, що однофакторні моделі

$y = f_i(x_i)$ , відповідно до параметрів яких визначаються [29] оперативно-технічні рекомендації, за різних умов стабілізації можуть відрізнитись (табл. 2).

Таблиця 2– Однофакторні моделі  $y = f_i(x_i)$  за різних умов стабілізації

Фактор	У зоні максимуму	У центрі факторного простору	У зоні мінімуму
$x_1$	$y = (b_0 - b_2 - b_3) + (b_1 - b_{12} - b_{13}) \cdot x_1 + b_{11} \cdot x_1^2$	$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_{11} \cdot x_1^2$	$y = (b_0 + b_2 + b_3 + b_{22} + b_{33}) + (b_1 + b_{12} + b_{13}) \cdot x_1 + b_{11} \cdot x_1^2$
$x_2$	$y = (b_0 - b_1 - b_2 + b_{11}) + (b_3 - b_{12} - b_{23}) \cdot x_2 + b_{22} \cdot x_2^2$	$y = b_0 + b_2 \cdot x_2 + b_{22} \cdot x_2^2$	$y = (b_0 + b_1 + b_2 + b_{11}) + (b_3 + b_{12} + b_{23}) \cdot x_2 + b_{22} \cdot x_2^2$
$x_3$	$y = (b_0 - b_1 - b_3 + b_{11}) + (b_2 - b_{13} - b_{23}) \cdot x_3$	$y = b_0 + b_3 \cdot x_3$	$y = (b_0 + b_1 + b_3 + b_{11}) + (b_2 + b_{13} + b_{23}) \cdot x_3$

Джерело: розробка авторів

У цьому разі для розрахунку значень дисперсій оцінок отриманих коефіцієнтів також можна використовувати готові [38] вирази

$$\sigma_{\bar{x}}\{b_0\} = A_0 \cdot \sigma_{\bar{x}}, \quad (24)$$

$$\sigma_{\bar{x}}\{b_i\} = A_i \cdot \sigma_{\bar{x}}, \quad (25)$$

$$\sigma_{\bar{x}}\{b_{ij}\} = A_{ij} \cdot \sigma_{\bar{x}}, \quad (26)$$

$$\sigma_{\bar{x}}\{b_{ii}\} = A_{ii} \cdot \sigma_{\bar{x}}, \quad (27),$$

які застосовуються для обчислювання відповідних критичних значень

$$b_{кр} = t \cdot \sigma\{b\}, \quad (28)$$

де  $t$  береться з таблиць [36] за обраного рівня значущості  $\alpha$  та числі ступенів свободи.

Отримані значення (28) дають змогу за кожного рівня ризику  $\alpha$  побудувати та проаналізувати графі зв'язку між факторами у разі зростаючого ризику для моделі (3). Враховуючи те, що під час проведення пошукових досліджень, а дослідження систем «людина – техніка – середовище» належить саме до таких [35], цей процес доцільно здійснювати від рівня

значущості двостороннього ризику  $\alpha=0,01$  до рівня  $\alpha=0,2$ .

Цей процес здійснюється через аналіз відповідних однофакторних моделей  $y = f_i(x_i)$ , отриманих за стабілізації інших факторів.

Оскільки однофакторні моделі, визначені на рівнях, що відповідають координатам екстремумів  $y_{i \min}$  та  $y_{i \max}$ , а також у центрі факторного простору  $y_0$  можуть відрізнитись (табл. 2). Відповідно можуть відрізнитись і пропозиції щодо ефективності проведення підводного розмінування, які будуть отримані для центра факторного та для його країв. Тобто обґрунтування пропозицій щодо підвищення ефективності підводного розмінування доцільно здійснювати за максимальними перепадами  $\Delta y$ .

Для визначення того, які вихідні чинники з множини  $X$  потребують першочергової уваги в центрі факторного простору ( $x_0^{(i)}$ ) та на його краях ( $x_{\min}^{(i)}; x_{\max}^{(i)}$ ) необхідно проранжувати відповідно до ваги коефіцієнтів за відповідної змінної в (3) у центрі факторного простору

$$(x_0^{(1)} \geq x_0^{(2)} \geq x_0^{(3)}) = \text{rang} \left\{ \begin{array}{l} |b_{y_0(x_1)}| \\ |b_{y_0(x_2)}| \\ |b_{y_0(x_3)}| \end{array} \right\} \quad (29)$$

та на його краях

$$(x_{\min,(\max)}^{(1)} \geq x_{\min,(\max)}^{(2)} \geq x_{\min,(\max)}^{(3)}) = \text{rang} \left\{ \begin{array}{l} |b_{y_{\min,(\max)}(x_1)}| \\ |b_{y_{\min,(\max)}(x_2)}| \\ |b_{y_{\min,(\max)}(x_3)}| \end{array} \right\}. \quad (30)$$

Аналіз ваги коефіцієнтів в однофакторних моделях відповідно до (29) та (30) дасть змогу провести ранжування обраних факторів та визначити, який з них є найбільш вагомим, та навпаки, у кожній зоні. Оскільки обґрунтування пропозицій в цьому випадку базується на (3), де враховано вплив (у тому разі нелінійний) не тільки безпосередньо кожного окремого показника  $x_i$ , а й ефекти взаємодії з іншими показниками  $x_j (j \neq i)$ , то вони

(пропозиції) мають оперативно-технічний характер і стають основою конкретних оперативно-технічних рекомендацій, оскільки обрані фактори характеризують як технічну (фактор  $x_3$ ), так і оперативну складові: роботу особового складу (людський фактор  $x_1$ ) відділення підводного розмінування в умовах впливу навколишнього середовища (фактор  $x_2$ ).

**Висновки та напрями подальших досліджень.** Важливою та нерозв'язаною частиною проблеми

підвищення ефективності попередження надзвичайних ситуацій, пов'язаних із підводним розташуванням вибухонебезпечних предметів, є відсутність методики обґрунтування оперативно-технічних рекомендацій щодо скорочення часу підводного розмінування водолазами-саперами ДСНС України без зниження рівня безпеки особового складу;

– відповідно до наявної математичної моделі методика обґрунтування оперативно-технічних рекомендацій щодо скорочення часу підводного розмінування являє собою сукупність таких послідовних дій:

– вибір варіантів оперативної діяльності під час підводного

розмінування; їх експертна оцінка відповідно до плану 3x3x2 з урахуванням факторів, які характеризують рівень підготовленості водолазів-саперів, умови, в яких вони працюють, а також оснащення;

– визначення параметрів багатофакторних моделей підводного розмінування та перевірка їх достовірності;

– їх аналіз та спрощення з подальшим ранжуванням факторів в центрі факторного простору та на його краях;

– експертне обґрунтування рекомендацій для впровадження;

– вибір і реалізація оперативно-технічних рекомендацій.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Dario Matika, Slavko Barić, Maritime environmental security. *Scientific Journal of Maritime Research*. 2016. Vol. 30. P. 19–27. doi : <https://doi.org/10.31217/p.30.1.3>.
2. Соловійов І. І., Стрілець В. М. Проблемні питання виконання робіт з підводного розмінування. *Енергозбереження та промислова безпека : виклики та перспективи* : матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції. Київ : КПІ ННДІ ПБраОП, 2020. С. 225–23.
3. Про затвердження Стандартної оперативної процедури 09.10-12(1)/ДСНС : «Порядок проведення органами та підрозділами цивільного захисту очищення (розмінування) територій, забруднених вибухонебезпечними предметами. Оперативне реагування» : наказ ДСНС України від 08.08.2018 р. № 461. *ZakonOnline* : вебсайт. URL : [https://zakononline.com.ua/documents/show/56964\\_56964](https://zakononline.com.ua/documents/show/56964_56964) (дата звернення : 24.10.2022).
4. Möller Gunnar From a DC-3 to BOSB : The Road to a Breakthrough in Military Safety Measures Against the Risks of Historic, Explosive Ordnance. *Marine Technology Society Journal*. Vol. 45. № 6, 2011. pp. 26–34(9). doi : [10.4031/MTSJ.45.6.1](https://doi.org/10.4031/MTSJ.45.6.1).
5. IMAS 09.60 : 2014, IDT. Underwater Survey and Clearance of Explosive Ordnance (EO). URL : [https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/www.mineactionstandards.org\\_fileadmin\\_MAS\\_documents\\_imas-international-standards\\_english\\_series-09\\_IMAS\\_09.60\\_Underwater\\_Surveyand\\_Clearance\\_of\\_Explosive\\_Ordnance\\_\\_EO\\_.pdf](https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/www.mineactionstandards.org_fileadmin_MAS_documents_imas-international-standards_english_series-09_IMAS_09.60_Underwater_Surveyand_Clearance_of_Explosive_Ordnance__EO_.pdf) (last accessed 24.10.2022).
6. Standard Operating Procedures for Humanitarian Underwater Demining in South Eastern Europe. URL : <https://old.mineactionstandards.org/fileadmin/MAS/documents/references-publications/Humanitarian-Underwater-Demining-in-South-Eastern-Europe.pdf> (last accessed 24.10.2022).
7. Humanitarian Demining, Geneva International Centre for «A Guide to Survey and Clearance of Underwater Explosive Ordnance». *Global CWD Repository*. 2016. pp. 1326. URL : <https://commons.lib.jmu.edu/cisr-globalcwd/1326> (last accessed 24.10.2022).
8. Frey Torsten, Beldowski Jacek, Maser Edmund Explosive Ordnance in the Baltic Sea : New Tools for Decision Makers. *The Journal of Conventional Weapons Destruction*. 2020. Vol. 23 : Iss. 3. pp. 11. URL : <https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol23/iss3/11> (last accessed 24.10.2022).
9. Frederic Maussang, Jocelyn Chanussot, Michèle Rombaut, Maud Amate From statistical detection to decision fusion : detection of underwater mines in high resolution SAS images. *Advances in Sonar Technology* / edited by Sergio Rui Silva. In-Tech. 2009. pp.111–150. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02118475/document> (last accessed 24.10.2022).
10. Mareike Kampmeier, Eefke Mvander Lee, UweWichert, JensGreinert Exploration of the munition dumpsite Kolberger Heide in Kiel Bay, Germany : Example for a standardised hydroacoustic and optic monitoring approach. *Continental Shelf Research*. Vol. 198. (15). 2020. pp. 104–108. doi : [10.1016/j.csr.2020.104108](https://doi.org/10.1016/j.csr.2020.104108).
11. Коцюрuba В., Цыбуля С., Рыбалко В. «Обоснование применения метода воздушной разведки района интенсивного применения минного оружия». *Журнал научных трудов «Социальное развитие и безопасность»* Вып. 9 (1). 2019. С. 60–68. doi : [10.33445/sds.2019.9.1.5](https://doi.org/10.33445/sds.2019.9.1.5).
12. Sayle Stephen, Windeyer Tom, Charles Michael, Conrod Scott, Stephenson Malcolm. Site Assessment and Risk Management Framework for Underwater Munitions. *Marine Technology Society Journal*. Vol. 43. № 4. 2009. pp. 41–51. doi : [10.4031/MTSJ.43.4.10](https://doi.org/10.4031/MTSJ.43.4.10).
13. The British Army - Commando Engineer Diver. UK Ministry of Defence. Retrieved 17 April 2017. URL : <https://www.army.mod.uk/who-we-are/corps-regiments-and-units/corps-of-royal-engineers/> (last accessed 24.10.2022).
14. Marco Werman, Irwin Loy. Training to Become Cambodia's First Underwater Deminers. *The World (Arts, Culture & Media)*. 2013. March 07. URL : [https://www.pri.org/stories/2013-03-07/training-become-cambodias-first-under water-deminers](https://www.pri.org/stories/2013-03-07/training-become-cambodias-first-under-water-deminers) (last accessed 24.10.2022).

15. Mijajlovic Veselin The Regional Center for Divers Training and Underwater Demining. *The Journal of ERW and Mine Action*. Vol. 17 : Iss. 2. 2013. pp. 13. URL : <https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol17/iss2/13> (last accessed 24.10.2022).
16. Huet C., Mastroddi F. Autonomy for underwater robots – a European perspective. *Auton Robot* 40. 2016. pp. 1113–1118. doi : 10514-016-9605-x.
17. Nick Cooper, Simon Cooke, Kevin Burgess. Risky Business Dealing with Unexploded Ordnance (UXO) in the Marine Environment. *Coasts, Marine Structures and Breakwaters*. Published Online : August 21, 2018. doi : 10.1680/cmsb.63174.0157.
18. Mijajlovic Veselin The Regional Center for Divers Training and Underwater Demining. *The Journal of ERW and Mine Action*. Vol. 17 : Iss. 2. 2013. pp. 13. URL : <https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol17/iss2/13> (last accessed 24.10.2022).
19. Грицаенко М. Разработка модели информационной платформы для обезвреживания потенциально опасных подводных объектов. *Технологический аудит и производственные резервы*. 2017. 2 (40), С. 57–62. doi :10.15587/2312-8372.2018.129208.
20. Olga Lucia, Lopera Tellez, Alexander Borghraef, Eric Mersch. *The Special Case of Sea Mines / Charles Beumier, Damien Closson, Vinciane Lacroix, Nada Milisavljevic, Yann Yvinec*. Mine Action – The Research Experience of the Royal Military Academy of Belgium. IntechOpen. 2017. doi : 10.5772/66994.
21. *Mine Action* : Book of Papers International Symposium 8 th to 11th April. 2019. Slano. Croatia. URL : <http://www.ctro.hr/wp-content/uploads/2019/04/Knjiga-za-web-4-mb.pdf> (last accessed 24.10.2022).
22. Olasunkanmi Habeeb Okunola Spatial analysis of disaster statistics in selected cities of Nigeria. *International Journal of Emergency Management*. 2019 Vol.15. №4. pp. 299–315. doi :10.1504/IJEM.2019.104195.
23. Ralf Josef Johanna Beerens Does the means achieve an end? A document analysis providing an overview of emergency and crisis management evaluation practice in the Netherlands. *International Journal of Emergency Management*. 2019. Vol.15. № 3. pp. 221–254. doi : 10.1504/IJEM.2019.102310.
24. Kayvan Yousefi Mojir, Sofie Pilemalm Actor-centred emergency response systems : a framework for needs analysis and information systems development. *International Journal of Emergency Management (IJEM)*. 2016. Vol. 12. № 4. pp.435–456. doi :10.1504/ IJEM.2016.079844.
25. Willem Treurniet, Kees Boersma, Peter Groenewegen Configuring emergency response networks. *International Journal of Emergency Management*. 2019. Vol.15. №4. pp.316–333. doi : 10.1504/IJEM.2019.104200.
26. Gibson T. D., Scott N. Views from the Frontline and Frontline methodology : critical reflection on theory and practice. *Disaster Prevention and Management*. 2018. Vol. 28. № 1. pp. 6–19. doi : 10.1108/DPM-07-2018-0214.
27. Garnier E. Lessons learned from the past for a better resilience to contemporary risks. *Disaster Prevention and Management*. 2019. Vol. 28 № 6. pp. 786–803. doi : 10.1108/DPM-09-2019-0303.
28. Стрелец В. М. Имитационный анализ системы «человек-машина» как метод эргономической оценки функционирования аварийных служб. *Научно-технический журнал «Радиоэлектроника и информатика»*. 2001. № 3 (16). С. 125–128.
29. Соловйов І. І. Математична модель підводного розмінування водозадами-саперами ДСНС України. *Комунальне господарство міст*. 2021. № 6 (166). С. 175–183. doi 10.33042/2522-1809-2021-6-166-175-183.
30. Соловйов І. І., Стецюк Є. І., Стрелець В. М. Закономірності розходу повітря під час підводного розмінування водних акваторій. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2020. № 2 (32). С. 132–144. doi : 10.5281/zenodo.4400181.
31. Стрелец В. М. Применение экспертного метода для непосредственной оценки результатов деятельности. *Информационные системы* : сб. науч. тр. НАНУ, ПАНИ, ХВУ. 1998. Вып. 2(10). С.165–168.
32. Бешелев С. Д., Гурвич Ф. Г. Математико-статистические методы экспертных оценок. М. : Статистика, 1974. 264 с.
33. Стрелец В. М. Раскрытие закономерностей выполнения основных операций боевого развертывания пожарных автомобилей. *Системы озброєння і військова техніка*. 2015. Вип. 2(42). С. 173–175.
34. Стрелец В. М. Раскрытие закономерностей выполнения основных операций боевого развертывания пожарных автомобилей. *Системы озброєння і військова техніка*. 2015. Вип. 2 (42). С.173–175.
35. Вознесенский В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. М. : Финансы и статистика, 1981. 263 с.
36. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений. М. : «Наука», 1971. 576 с.

## REFERENCES

1. Dario Matika, Slavko Barić (2016). Maritime environmental security. *Scientific Journal of Maritime Research*, 30, 19–27. doi: <https://doi.org/10.31217/p.30.1.3> [in English].
2. Solovjov, I., Strilecz, V. (2020). Problemini py'tannya vy'konannya robot z pidvodnogo rozminuvannya [Problematic issues of underwater demining]. Enerhozberezhennia ta promyslova bezpeka: vyklyky ta perspektyvy: materialy III Mizhnarodnoi nauko- praktychnoi konferentsii [Energy conservation and industrial safety: challenges and prospects: materials of the 3rd International Scientific and Practical Conference]. Kyiv. Retrieved from [http://dspace.opu.ua/jspui/bitstream/123456789/11111/1/Bochkovskiy%20A.\\_Sapozhnikova%20N..pdf](http://dspace.opu.ua/jspui/bitstream/123456789/11111/1/Bochkovskiy%20A._Sapozhnikova%20N..pdf) [in Ukrainian].
3. Pro zatverdzhennia Standartnoi operatyvnoi protsedury 09.10-12(1)/DSNS: «Porjadok provedennia orhanamy ta pidrozdilamy tsyvilnoho zakhystu ochyshchennia (rozminuvannia) terytorii, zabrudnennykh vybukhonebezpechnymy predmetamy. Operatyvne reahuvannia» [On approval of Standard Operating Procedure 09.10-12(1)/DSNS: «Procedure for cleaning (demining) territories contaminated by explosive objects by civil defense bodies and units. Prompt response»]: nakaz DSNS Ukrainy vid 08.08.2018 r. № 461. *ZakonOnline: vebсайт*. Retrieved from [https://zakononline.com.ua/documents/show/56964\\_\\_56964](https://zakononline.com.ua/documents/show/56964__56964) [in Ukrainian].
4. Möller Gunnar (2011). From a DC-3 to BOSB: The Road to a Breakthrough in Military Safety Measures Against the Risks of Historic, Explosive Ordnance. *Marine Technology Society Journal*, 45 (6), 26–34(9). doi: 10.4031/MTSJ.45.6.1 [in English].
5. IMAS 09.60:2014, IDT. Underwater Survey and Clearance of Explosive Ordnance (EO). Retrieved from [https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/www.mineactionstandards.org\\_fileadmin\\_MAS\\_documents\\_imas-international-standards\\_english\\_series-09\\_IMAS\\_09.60\\_Underwater\\_Survey\\_and\\_Clearance\\_of\\_Explosive\\_Ordnance\\_\\_EO\\_.pdf](https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/www.mineactionstandards.org_fileadmin_MAS_documents_imas-international-standards_english_series-09_IMAS_09.60_Underwater_Survey_and_Clearance_of_Explosive_Ordnance__EO_.pdf) [in English].
6. Standard Operating Procedures for Humanitarian Underwater Demining in South Eastern Europe. Retrieved from <https://old.mineactionstandards.org/fileadmin/MAS/documents/references-publications/Humanitarian-Underwater-Demining-in-South-Eastern-Europe.pdf> [in English].
7. Humanitarian Demining, Geneva International Centre for «A Guide to Survey and Clearance of Underwater Explosive Ordnance» (2016). *Global CWD Repository*, 1326. Retrieved from <https://commons.lib.jmu.edu/cisr-globalewd/1326> [in English].
8. Frey Torsten, Beldowski Jacek, Maser Edmund (2020). Explosive Ordnance in the Baltic Sea: New Tools for Decision Makers. *The*

- Journal of Conventional Weapons Destruction*, 23: 3, 11. Retrieved from <https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol23/iss3/11> [in English].
9. Frederic Maussang, Jocelyn Chanussot, Michèle Rombaut, Maud Amate (2009). From statistical detection to decision fusion: detection of underwater mines in high resolution SAS images. *Advances in Sonar Technology*. Sergio Rui Silva (Ed). In-Tech, 111–150. Retrieved from <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02118475> [in English].
  10. Mareike Kampmeier, Eefke Mvander Lee, UweWichert, JensGreinert (2020). Exploration of the munition dumpsite Kolberger Heide in Kiel Bay, Germany: Example for a standardised hydroacoustic and optic monitoring approach. *Continental Shelf Research*. 198 (15), 104–108. doi: 10.1016/j.csr.2020.104108 [in English].
  11. Kotsyuruba, V., Tsybulia, S., Rybalko, V. (2019). Obgruntuvannya dotsil'nosti vykorystannya sposobu povitryanoi rozvidky rayoniv intensyvnogo zastosuvannya minnoyi zbroyi [Justification of the using of the method of air reconnaissance of area of intensive application of mine weapons]. *Zhurnal nauchnykh trudov «Sotsyalnoe razvytye y bezopasnost»*, 9 (1), 60–68. doi: 10.33445/sds.2019.9.1.5 [in Russian].
  12. Sayle, S., Windeyer, T., Charles, M., Conrod, S., Stephenson, M. (2009). Site Assessment and Risk Management Framework for Underwater Munitions. *Marine Technology Society Journal*, 43 (4), 41–51. doi: 10.4031/MTSJ.43.4.10 [in English].
  13. The British Army - Commando Engineer Diver. UK Ministry of Defence. Retrieved 17 April 2017 Retrieved from <https://www.army.mod.uk/who-we-are/corps-regiments-and-units/corps-of-royal-engineers/> [in English].
  14. Marco Werman, Irwin Loy (2013, March 07). Training to Become Cambodia's First Underwater Deminers. *The World (Arts, Culture & Media)*. Retrieved from <https://www.pri.org/stories/2013-03-07/training-become-cambodias-first-underwater-deminers> [in English].
  15. Mijajlovic Veselin (2013). The Regional Center for Divers Training and Underwater Demining. *The Journal of ERW and Mine Action*. 17: 2, 13. Retrieved from <https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol17/iss2/13> [in English].
  16. Huet, C., Mastroddi, F. (2016). Autonomy for underwater robots – a European perspective. *Auton Robot* 40, 1113–1118. doi: 10514-016-9605-x [in English].
  17. Nick Cooper, Simon Cooke, Kevin Burgess. Risky Business (2018, August 21). Dealing with Unexploded Ordnance (UXO) in the Marine Environment. *Coasts, Marine Structures and Breakwaters*. Published Online. doi: 10.1680/cmsb.63174.0157 [in English].
  18. Mijajlovic Veselin (2013). The Regional Center for Divers Training and Underwater Demining. *The Journal of ERW and Mine Action*, 17: 2, 13. Retrieved from <https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol17/iss2/13> [in English].
  19. Gricaenko, M. (2017). Razrobotka modeli informacionnoj platformy dlya obezvrezhivaniya potencial'no opasnykh podvodnykh ob'ektov [Development of an information platform model for the neutralization of potentially dangerous underwater objects.]. *Tekhnologicheskij audit i proizvodstvennye rezervy*, 2 (40), 57–62. doi: 10.15587/2312-8372.2018.129208 [in Ukrainian].
  20. Olga Lucia, Lopera Tellez, Alexander Borghgraef, Eric Mersch (2017). *The Special Case of Sea Mines* / Charles Beumier, Damien Closson, Vinciane Lacroix, Nada Milisavljevic, Yann Yvinec. Mine Action - The Research Experience of the Royal Military Academy of Belgium. IntechOpen. doi: 10.5772/66994[in English].
  21. *Mine Action: Book of Papers International Symposium 8 th to 11th April. 2019*. Slano. Croatia. Retrieved from <https://www.ctro.hr/wp-content/uploads/2020/11/Knjiga-za-web-4-mb.pdf> [in English].
  22. Olasunkanmi Habeeb Okunola (2019). Spatial analysis of disaster statistics in selected cities of Nigeria. *International Journal of Emergency Management*, 15 (4), 299–315. doi: 10.1504/IJEM.2019.104195 [in English].
  23. Ralf Josef Johanna (2019). Beerens Does the means achieve an end? A document analysis providing an overview of emergency and crisis management evaluation practice in the Netherlands. *International Journal of Emergency Management*, 15 (3), 221–254. doi: 10.1504/IJEM.2019.102310 [in English].
  24. Kayvan Yousefi Mojir, Sofie Pilemalm (2016). Actor-centred emergency response systems: a framework for needs analysis and information systems development. *International Journal of Emergency Management (IJEM)*, 12, (4), 435–456. doi:10.1504/IJEM.2016.079844 [in English].
  25. Willem Treurniet, Kees Boersma, Peter Groenewegen (2019). Configuring emergency response networks. *International Journal of Emergency Management*, 15, (4), 316–333. doi: 10.1504/IJEM.2019.104200 [in English].
  26. Gibson, T. D., Scott, N. (2018). Views from the Frontline and Frontline methodology: critical reflection on theory and practice. *Disaster Prevention and Management*, 28 (1), 6–19. doi: 10.1108/DPM-07-2018-0214 [in English].
  27. Garnier, E. (2019). Lessons learned from the past for a better resilience to contemporary risks. *Disaster Prevention and Management*, 28 (6), 786–803. doi: 10.1108/DPM-09-2019-0303 [in English].
  28. Strelec, V. (2001). Imitacionnyj analiz sistemy «chelovek-mashina» kak metod ergonomicheskoy ocenki funkcionirovaniya avariynnykh sluzhb [Simulation analysis of the "man-machine" system as a method of ergonomic evaluation of the functioning of emergency services]. *Nauchno-tehnicheskij zhurnal «Radioelektronika i informatika»*, 3 (16), 125–128. [in Russian]
  29. Soloviev, I. (2021). Matematychna model pidvodnoho rozminuvannya vodolazamy-saperamy DSNS Ukrainy [Mathematical model of underwater penetration by sappers of the DSNS of Ukraine]. *Komunalne hospodarstvo mist*, 6(166), 175–183. doi: 10.33042/2522-1809-2021-6-166-175-183 [in Ukrainian].
  30. Soloviev, I., Stetsiuk, Y., Strelets, V. (2020). Zakonomirnosti rozkhdou povitria pid chas pidvodnoho rozminuvannya vodnykh akvatorii [Regularities of air consumption during underwater demining of water areas]. *Problemy nadzvychainykh sytuatsii*, 2 (32), 132–144. doi: 10.5281/zenodo.4400181 [in Ukrainian].
  31. Strelets, V. (1998). Primenenie ekspertnogo metoda dlya neposredstvennoi otsenki rezultatov deyatelnosti [The use of an expert method for direct assessment of the results of activities]. *Information systems, NANU, PANI, HVU*, 2 (10), 165–168. [in Russian].
  32. Beshelev, S., Gurvich, F. (1974). Matematiko-statisticheskie metody ekspertnykh otsenok [Mathematical and statistical methods of expert assessments]. Moskva: Statistika [in Russian].
  33. Strelec, V. (2015). Raskrytie zakonomernostej vypolneniya osnovnykh operacij boevogo razvertyvaniya pozharnykh avtomobilej [Disclosure of regularities in the performance of the main operations of the combat deployment of fire trucks]. *Sistemy ozbroiennia i viiskova tekhnika*, 2(42), 173–175. [in Russian].
  34. Strelec, V. (2015). Raskrytie zakonomernostej vypolneniya osnovnykh operacij boevogo razvertyvaniya pozharnykh avtomobilej [Disclosure of regularities in the performance of the main operations of the combat deployment of fire trucks]. *Sistemy ozbroiennia i viiskova tekhnika*, 2(42), 173–175. [in Russian].
  35. Voznesenskij, V. (1981). *Statisticheskie metody planirovaniya eksperimenta v tekhniko-ekonomicheskikh issledovaniyah* [Statistical methods of experiment planning in feasibility studies]. Moskva: Finansy i statistika [in Russian].
  36. Mitropolskij, A. (1971). *Tehnika statisticheskikh vychislenij [Statistical Computing Technique]*. M: «Nauka» [in Russian].

## METHODOLOGY FOR SUBSTANTIATING OPERATIONAL AND TECHNICAL RECOMMENDATIONS ON REDUCING THE TIME OF UNDERWATER DEMINING BY DIVERS-SAPPERS OF THE STATE EMERGENCY SERVICE OF UKRAINE

I. Soloviov<sup>1</sup>, V. Strelets<sup>2</sup>, O. Blyashenko<sup>3</sup>, V. Servatyuk<sup>4</sup>, A. Pruskyi<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Emergency rescue squad for special purposes of Main Directorate of the State Emergency Service of Ukraine in Kherson region, Ukraine

<sup>2</sup> National University of Civil Defence of Ukraine, Ukraine

<sup>3</sup> Ministry of Defence of Ukraine, Ukraine

<sup>4</sup> The National Defence University of Ukraine named after Ivan Cherniakhovskyi Institute of State Military Administration, Ukraine

<sup>5</sup> Institute of Public Administration and Research in Civil Protection, Ukraine

---

### KEYWORDS:

underwater demining, diver-sapper, expert assessments, multifactorial model, methodology

### ANNOTATION

The conducted analysis showed that an important and unresolved part of the problem of increasing the effectiveness of preventing emergency situations related to the underwater location of explosive objects is the lack of a methodology for substantiating operational and technical recommendations for reducing the time of underwater demining by divers-sappers of the State Emergency Service of Ukraine.

The application of systematic ergonomic analysis to represent the activity of a diver-sapper in the form of the functioning of the system «diver-sapper – technical support of underwater demining – underwater location of an explosive object», statistical methods of planning experimental studies and processing the obtained results, as well as mathematical and statistical methods of direct expert evaluations allowed to develop such a methodology, the basis of which is a multifactorial mathematical model. The methodology represents a set of the following sequential actions: selection of options for operational activities (such significant factors as the level of preparedness of the diver-sapper; the conditions of the underwater environment in which the personnel work; the level of their equipment are highlighted); direct expert evaluation of the execution time of the selected options in accordance with the 3x3x2 plan, taking into account the agreement of the experts; determination of parameters of underwater demining models using standard formulas of the theory of experiment planning and verification of their reliability; - analysis and simplification of models with subsequent ranking of factors both in the center of the factor space and at its edges; substantiation of recommendations, substantiation of recommendations that are of an operational and technical nature, since the selected factors characterized both operational (personnel work under environmental conditions) and technical components of the underwater demining process, and their implementation.



УДК 614.842.68

## МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПОЛІМЕРНИХ ГЕЛЕВИХ РОЗЧИНІВ ДЛЯ ГАСІННЯ СМІТТЄЗВАЛИЩ І ПОЛІГОНІВ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2.122-133>

Кодрик, А. І., ORCID iD 0000-0002-3787-5674

Тітенко О. М., ORCID iD 0000-0002-4950-8580

Борисов, А. В. ORCID iD 0000-0001-6858-0492

Мороз, О.І. ORCID iD 0000-0002-8985-8593

Тимошенко, О. М., ORCID iD 0000-0001-7568-5030

Стилик І. Г., ORCID iD 0000-0002-8474-2014

\*E-mail: andr.borisov@ukr.net

*Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Україна*

### ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

*Надійшла до редакції:*

10.11.2022

*Пройшла рецензування:*

19.11.2022

### КЛЮЧОВІ СЛОВА:

безпека праці, полігони  
ТПВ, пожежогасіння,  
полімерні  
гелеутворювальні сполуки,  
в'язкість речовини,  
газоподібні та рідкі  
речовини, структура  
сміттєзвалища

### АНОТАЦІЯ

Розглянуто небезпеки, пов'язані з ліквідацією пожеж і надзвичайних ситуацій на об'єктах сміттєзвалищ та полігонів побутових відходів. Проведено аналіз вітчизняних і зарубіжних джерел за напрямом досліджень. Виявлено, що особливості гасіння цих об'єктів пов'язані зі складом та структурою горючих матеріалів, які можуть утворювати безліч осередків тління, мають спроможність до повторного займання та відносно низьке значення пожежного навантаження. Встановлено, що активну участь у підтриманні процесу горіння бере повітря, яке надходить з навколишнього середовища через пористу структуру сміттєзвалища. Зазначено, що наявні технології гасіння полігонів не є ефективними. Досліджено процес виходу продуктів згоряння крізь пористе тіло, яким є структура звалища. З огляду на це отримано інформацію про просторове розгалуження потоків нагрітих газів, на підґрунті чого розроблено схему проходження повітряних потоків від виходів. Визначено можливі шляхи підвищення ефективності ізолювання та гасіння пожеж полігонів побутових відходів. Як нову вогнегасну речовину пропонується розглянути водний розчин полімерної гелеутворювальної речовини типу ECOFLOC A-07 із додаванням поверхнево-активних речовин. Використання розчину гідрогелю у концентрації до 0,3 % у 2...3,5 рази підвищує коефіцієнт використання води порівняно із застосуванням лише води. У разі використання гелю під час гасіння вогнищ унеможливується повторне загоряння, навіть за подальшої дії відкритим полум'ям. Частки гелю перекривають повітряні канали, блокуючи доступ повітря через тіло, всередині тіла та на його поверхні температура не перевищує 80–100°C. Визначено ефективність використання гідрогелів щодо їх витрати та товщини гідрогелевих плівок різної в'язкості порівняно з водою. Змінюючи концентрацію гелеутворювальних добавок можна варіювати в'язкість, випаровуваність розчину та глибиною проникнення вогнегасної речовини до середовища. Наявність у складі гідрогелю солей калію призводить не тільки до збільшення коефіцієнта використання води до 5,4 рази, а й дає можливість поєднати ефективно охолодження осередку пожежі через збільшення ефективності використання води з інгібувальним ефектом. Вогнегасний розчин із добавкою полімерного гідрогелю під дією температури утворює полімерну плівку, яка збільшує адгезію як до палаючої, так і до поверхні, що захищається від загоряння, водночас ізолює її від доступу кисню, перешкоджаючи інтенсивному стіканню вогнегасної речовини, частково заповнюючи пористу структуру сміттєзвалища, має підвищені вогнегасні властивості та суттєво зменшує втрати вогнегасної речовини. Отримані результати свідчать про можливість застосування водних вогнегасних розчинів з використанням в'язких гідрогелів під час гасіння твердих речовин в атмосферних умовах, але зазначене потребує подальших досліджень.

**Постановка проблеми.** Полігони твердих побутових відходів (далі – ТПВ) є потенційно небезпечними об'єктами, на яких використовують та/або виготовляють, переробляють, зберігають чи транспортують небезпечні речовини, біологічні препарати, а також інші матеріали, що за певних обставин можуть створити реальну загрозу виникнення аварії [1–3].

Тіло полігону (рис. 1) не є цільною однорідною масою, воно завжди має повітряні кишені (канали) в тілі звалища, якими розподіляється повітря, що підтримує процес горіння. Кишені утворюються внаслідок складування великогабаритного сміття, недостатнього трамбування та відсутності пересипки маси, потоків після проходження атмосферної води, тому структура його постійно змінюється, що ускладнює роботи з його гасіння [4–7].

Гасіння пожеж полігонів побутових відходів має особливості, пов'язані зі складом та структурою горючих матеріалів, які можуть утворювати безліч осередків тління, мають спроможність до повторного займання та відносно низьке значення пожежного навантаження порівняно з техногенним. Отже, вирішення питання підвищення ефективності гасіння пожеж, які виникають на сміттєзвалищах і полігонах твердих побутових відходів, є надзвичайно актуальним.



*Рисунок 1* – Найбільше звалище України - Грибовицьке – село Великі Грибовищі Жовківського району в декількох кілометрах від Львова

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Горіння на сміттєзвалищах виникає зазвичай через різке підвищення швидкості екзотермічних хімічних та біохімічних процесів, без зовнішнього джерела запалювання. У товщі сміттєзвалища акумулюється велика кількість горючих матеріалів, які виділяють шкідливі газоподібні та рідкі речовини, також наявна органіка – до 50%, що під час розкладання виділяє, зокрема, метан, який у разі займання активно підтримує горіння. Теплові потоки газових продуктів екзотермічних реакцій ініціюють механізми циркуляції газів у товщі звалища та введення свіжих повітряних мас, що за умови перевищення кількості тепла, яке виділяється під час екзотермічних реакцій, і кількості віддачі тепла в навколишній простір призводить до самозаймання горючих речовин.

У [7] встановлено, що пожежна небезпека сміття залежить від ущільнення полігонів ТПВ. Чим більша щільність сміття на полігонах, тим менша ймовірність виникнення пожеж унаслідок самозаймання. У роботі [4] виконано математичне моделювання процесу виходу продуктів згоряння крізь пористе тіло, яким є структура звалища. Це дало змогу отримати інформацію про просторове розгалуження потоків нагрітих газів, на основі яких розроблено схему (рис. 2) проходження повітряних потоків від виходів.

Згідно з результатами статистичної обробки та нашими вимірами [4] можна констатувати, що середнє значення коефіцієнта повітропроникності середовища сміттєзвалища складає близько 5000 Дарсі з відносною середньоквадратичною похибкою 9% та відносним граничним відхиленням 18% з довірчою ймовірністю 95%.

Були визначені наближені геометричні співвідношення між глибиною осередку пожежі ( $H$ ), діаметром поверхні виходу продуктів згоряння ( $d$ ), поверхні, через яку надходять свіжі маси повітря (кільце між  $D$  та  $d$ ), та розроблена розрахункова модель горіння сміття під час займання в товщі сміттєзвалища.

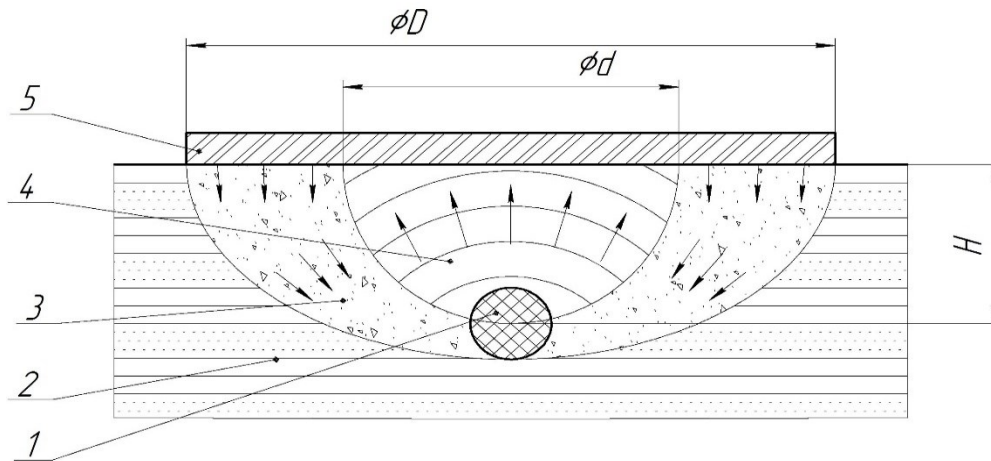


Рисунок 2 – Переріз сміттєзвалища у місці осередку пожежі.

1 – Осередок пожежі, 2 – переріз сміттєзвалища, 3 – потік повітря з навколишнього середовища, 4 – потік продуктів згоряння, 5 – шар захисного вогнегасного матеріалу

Активну участь у підтриманні процесу горіння бере повітря, яке надходить з навколишнього середовища через пористу структуру сміттєзвалища. Співвідношення між глибиною розташування одиночного осередку пожежі до максимального діаметра можливого підсосу повітря з поверхні становить 1:2. У разі дифузійного горіння концентрація компонентів горючої суміші в зоні реакції горіння залежить від вмісту кисню в повітрі, що надходить в зону реакції горіння, і швидкості надходження горючих парів або газів в цю зону. З огляду на це [5–8] для зниження концентрації компонентів горючої суміші в зоні реакції рекомендовано два способи.

Перший – змінити склад повітря, який надходить в зону реакції горіння, знизивши в ньому вміст кисню до критичного значення, або розбавити газоподібні продукти, які надходять в зону реакції, інертними добавками. Такий метод припинення горіння отримав назву флегматизації або розведення.

Другий – припинити або зменшити до критичного значення кількість окиснювача, який надходить в зону реакції горіння, або продуктів випаровування пального за допомогою ізоляції компонентів горючої суміші один від одного, або поверхні пального від теплового впливу зони горіння. Такий метод припинення горіння називається

ізоляцією і буде розглянутий нижче під час його використання для локалізації та гасіння пожежі на сміттєзвалищах і полігонах ТПВ.

Застосування цього методу є ефективним у разі тління, але можливе його використання й під час полуменевого горіння. Зазначимо, що за концентрації кисню нижче 14–18% за обсягом припиняється тільки полуменеве горіння, а можливе й тління. Отже, під час припинення горіння твердих речовин необхідно ще тривалий час підтримувати потрібну концентрацію повітря, перш ніж забезпечити доступ повітря в зону горіння. Ефективність гасіння пожежі цим способом залежить від швидкості руйнування ізолювального шару на нагрітій поверхні палаючої речовини.

Для ліквідації загорянь на полігонах ТПВ використовують воду, вогнегасні порошки та повітряно-механічну піну [5; 6; 8]. Основним матеріалом, безумовно, є вода. Нанесена вода не використовується повністю, більша її частина просочується до нижніх шарів тіла звалища та призводить до таких негативних побічних наслідків, як підмивання сміття, утворення пустот у тілі полігону, утворення у підшві полігону кислотних озер і, як наслідок, виникнення провалів та зсувів окремих масивів сміттєзвалища, а також підвищення вологості у товщі

сміттєзвалища, що активізує хімічні реакції речовин.

У разі застосування піни, яка має низьку або середню кратність, за підвищених температур відбувається випаровування води. Піна має невеликий термін життєздатності та не може тривалий час підтримувати потрібну концентрацію кисню, що знову може призвести до займання складових полігону.

Ліквідація цих недоліків призводить до високих витрат води на гасіння, проведення операцій з додаткового гасіння осередків пожежі, що виникають після основного гасіння, та висування особливих вимог до водних вогнегасних речовин для їх гасіння.

Згідно з [5] у США використовують методи гасіння на основі запобігання потрапляння повітря на тліючу площу або охолодження займистого матеріалу. Дослідження пожеж, проведених у США [5], показало, що основним методом пожежогасіння є екскавація (викопування) відходів, які горять (40%), та накриття їх ґрунтом (29%) (рис. 3). Пожежогасіння водою використовується регулярно (17%), проте не так, як ґрунтовий метод, і завжди поєднується з ґрунтовим накриттям, екскавацією або разом. Зазначено, що нездатність погасити пожежу водою можливо пов'язана з подвійним впливом води на охолодження палаючих твердих відходів, а саме: це стимулювання його зменшення, але сприяння температурному зростанню. Також вода переважно може протікати через тверді відходи та витікати із площі тління. Введення інертного газу майже не використовувалося, лише щодо 3% звалищ повідомляли про введення (використання) інертного газу. Майже щодо 11% повідомляли про використання інших методів, а саме – накриття відходів піною або геомембраною та виключення (не використання) системи вилучення звалищного газу. Зазначимо, що в Україні такий аналіз не проводився.



Рисунок 3 - Методи гасіння в США

**Цілі досліджень, постановка завдання.** Підвищення ефективності водних вогнегасних розчинів можливе через застосування комбінованих вогнегасних речовин із використанням нового покоління гелеутворювальних речовин, так званих гідрогелів [9–12], які істотно полегшили роботу з їх використання, стали більш надійними і безпечними для навколишнього середовища та пристосувань. Гідрогель – це зшитий сополімер калієвої і амонійної солей акрилової кислоти, в якому немає солі натрію, що негативно впливає на металеві та інші поверхні.

Під час змішування з водою полімер миттєво її адсорбує, що за впливу особливих активаторів призводить до швидкої фазової інверсії емульсії, що звільняє аніонний полімер, який починає активно поглинати велику кількість води, водночас збільшуючи в'язкість розчину води залежно від концентрації гелевого концентрату. Концентрацію гелю у водних розчинах змінювали від 0,01 до 0,4% залежно від подальшого призначення розчину. Отриманий гель може використовуватися для гасіння пожеж твердих горючих матеріалів, пожеж екосистем, полігонів побутових відходів.

Залежно від фізико-хімічних показників, що визначають призначення, продукт класифікують як вогнегасну речовину або засіб вогне-, теплозахисту.

Гідрогель не випаровується і щільно накриває вогнище загоряння. Перевагою застосування гідрогелів [9; 11] є їх висока

оперативна вогнезахисна дія. Зв'язуючи воду на молекулярному рівні, гель у 15 разів підвищує охолоджувальну здатність води, утворює захисне покриття на поверхні твердих горючих матеріалів, локалізує та ліквідує осередки горіння. Одного літра концентрату достатньо для обробки масиву площею 24...40 м<sup>2</sup>. Він протистоїть вогню протягом 24 год. Крім того, на відміну від піни та інших токсичних порошків, які застосовуються для гасіння пожеж, гідрогель екологічно безпечний. Отриманий гель може використовуватися для гасіння пожеж твердих горючих матеріалів, пожеж екосистем, полігонів побутових відходів.

Потребує дослідження властивість розчину полімеру «прилипати» до палаючої поверхні, захищає поверхні від загоряння, ізолюючи її від доступу кисню, його інгібувальні властивості через вміст калію у складі та здатність до гальмування інтенсивного стікання розчину з поверхні. Попередньо встановлена його можливість багаторазово виділяти та адсорбувати водні розчини.

Застосування вогнегасного розчину з використанням гідрогелів потенційно має переваги:

- після нанесення розчину на поверхню через адгезивні властивості він залишається на поверхні сміттєзвалища тривалий час, забезпечуючи уникнення повторного займання;

- через значну його щільність та схильність до адгезії зі складовими полігону кількісна його потреба є значно меншою за воду;

- змінюючи концентрацію гелю у розчині, можна регулювати глибину його проникнення у тіло звалища.

Величина поверхневого натягу [11–12] у першому наближенні залежить тільки від вмісту ПАВ та його критичної величини, що наближено дорівнює 0,1 %, практично незалежно від вмісту інших компонентів. Величина відносної здатності до прилипання гідрогелю на основі полімерного гелеутворювача може досягати значних величин, від 7 до 8 разів порівняно з водою. У разі

додавання до цього ж складу 5 % ПАВ здатність до прилипання знижується до показника відносної (щодо води) здатності від 3 до 4 разів.

Висока відносна здатність до прилипання вогнегасної речовини на основі гідрогелю значно збільшує величину адгезійного та охолоджувального шару поверхні порівняно з водою. Захисний шар гідрогелю містить велику кількість води, яка прилипає до стінок, що може надійно захистити поверхні від нагріву. Це свідчить про можливість використання водного розчину полімерного гелеутворювача ECOFLOC F-07 сумісного з ПАР та мінеральними високодисперсними добавками фракційністю 20...60 меш, з концентрацією у воді від 0,01 до 0,4 % (далі – гідрогель) під час захисту й гасіння пожеж сміттєзвалищ і полігонів побутових відходів та потребує проведення досліджень.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Досліджувалися можливість використання як добавки до водних вогнегасних розчинів для гасіння повітропроникних матеріалів, якими є сміттєзвалища та полігони побутових відходів, вологого утримувального полімеру Ecofloc A-07 у вигляді розчину водорозчинних прозорих гранул, які підвищують адгезію розчину та здатні до плівкоутворення під час потрапляння на гарячу поверхню. Концентрацію гелю у водних розчинах змінювали від 0,01 до 0,4% залежно від подальшого призначення розчину.

Досліджувалися зміни в'язкості гідрогелю залежно від концентрації, його текучості та можливості проникнення у тіло повітропроникної структури, захисні властивості від відкритого полум'я, ефективність під час пожежогасіння. В основі вимірювання в'язкості вогнегасної речовини на основі гідрогелю близьких до верхньої межі діапазону лежить метод Стокса. Проведено фільмування падіння кульки в середовищі вогнегасної речовини

з фіксуванням часу падіння та довжини шляху падіння кульки.

На основі [13–14] виведена система рівнянь для визначення значень

$$\begin{cases} \omega(t) = \frac{D_s^2 \cdot (\rho_F - \rho) \cdot g}{18 \cdot \mu} \left( 1 - \exp\left(-\left(\mu \cdot \frac{12}{D_s^2 \cdot \rho_F}\right) \cdot t\right) \right) \\ L = \int_{t_0}^{t_{fin}} \omega(t) \cdot dt \end{cases}$$

де:  $\omega(t)$  – поточна швидкість кульки, м/с;

$D_s$  – діаметр сталеві кульки, м;

$\rho, \rho_F$  – густина випробуваної рідини та сталі, кг/м<sup>3</sup>;

$g=9.81$  м·с<sup>-2</sup> – прискорення вільного падіння;

$\mu$  – величина динамічної в'язкості випробуваної рідини, Па·с;

динамічної в'язкості залежно від максимальної швидкості тіла в умовах досліду

$t$  – поточний час, с;

$L$  – довжина падіння кульки, м.

Була визначена залежність в'язкості гідрогелевого середовища від доли гелеутворювача. Результати експериментів подані у таблиці 1.

Таблиця 1 – Залежність динамічної в'язкості гідрогелевого середовища від доли гелеутворювача на полімерній основі.

№	Вода, %	Вміст гелеутворювача%	Динамічна в'язкість, Па·с
1	100	0	0.001
2	99.99	0.01	0.0125
	99.9975	0.025	0.038
3	99.95	0,05	0.067
4	99,9	0,1	0.0125
5	99.8	0.2	0.107
6	99.7	0.3	0.868
7	99.6	0.4	21.375

У графічному вигляді залежність в'язкості гідрогелю, близької до верхньої межі діапазону, зображена на рис. 4.

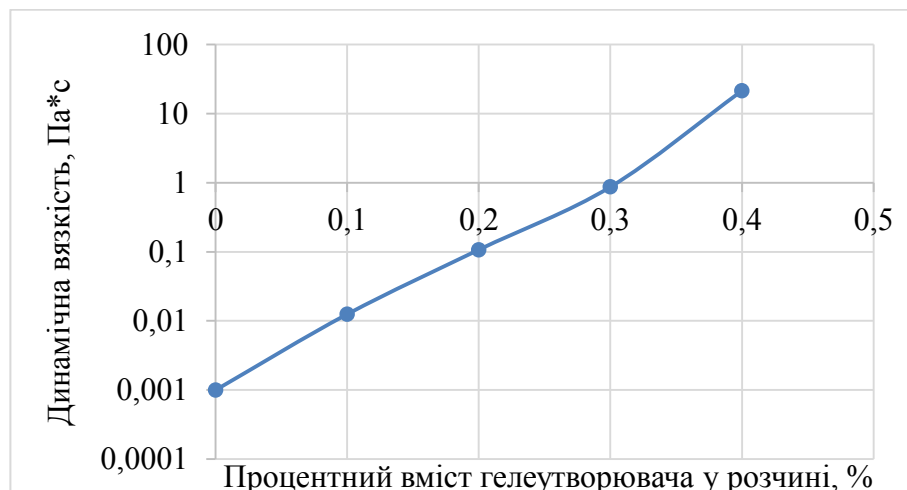


Рисунок 4 – Залежність динамічної в'язкості гідрогелевого середовища від частки гелеутворювача на полімерній основі

Використовуючи цей метод була визначена залежність в'язкості розчину у разі додавання у гідрогелеве середовище

ПАР. Встановлено, що додавання ПАР зменшує динамічну в'язкість приблизно удвічі, наприклад додавання 1,5%

піноутворювача у 0,2% розчин гідрогелю зменшує вязкість з 0,123 Па·с до 0,063 Па·с.

Рух рідини у пористому середовищі описується законом Дарсі [15], що має вигляд:

$$0 = -\vec{\nabla} \cdot p + \rho \cdot \vec{g} - \frac{\mu}{k_{pen}} \cdot \vec{\omega}, \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-2}, \quad (1)$$

де,  $k_{pen}$  – коефіцієнт Дарсі, або коефіцієнт проникності, що залежить від фізико-хімічних властивостей пористого середовища та визначається експериментально,  $\text{м}^2$ , (Д);

$\rho$  – густина рідини, що просочується крізь пористе середовище сміттєзвалища,  $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ;

$g$  – величина прискорення земного тяжіння,  $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$ ;

$\mu$  – динамічна в'язкість рідини, що просочується, Па·с;

$\omega$  – швидкість потоку рідини, що просочується крізь пористе середовище,  $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ .

З огляду на початкові умови відсутності градієнта тиску та розв'язуючи

рівняння (1) для нашого випадку в одномірному просторі (вертикальному), отримаємо величину швидкості потоку рідини, що просочується крізь пористе середовище сміттєзвалища:

$$\omega = k_{pen} \cdot \frac{\rho \cdot g}{\mu}, \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} \quad (2)$$

Експериментально було встановлено залежність динамічної в'язкості від процентного вмісту гелеутворювача [11]:

$$\mu(p) = \mu_{H_2O} + 0.105 \cdot (p)^{2.679}, \text{ Па} \cdot \text{с}, \quad (3)$$

де,  $\mu_{H_2O}$  – динамічна в'язкість води, Па·с,  $p$  – процентний вміст гелеутворювача, %.

З огляду на формули (1), (2), (3) отримуємо залежність швидкості просочування рідини залежно від її в'язкості, що ілюструється рис. 5.

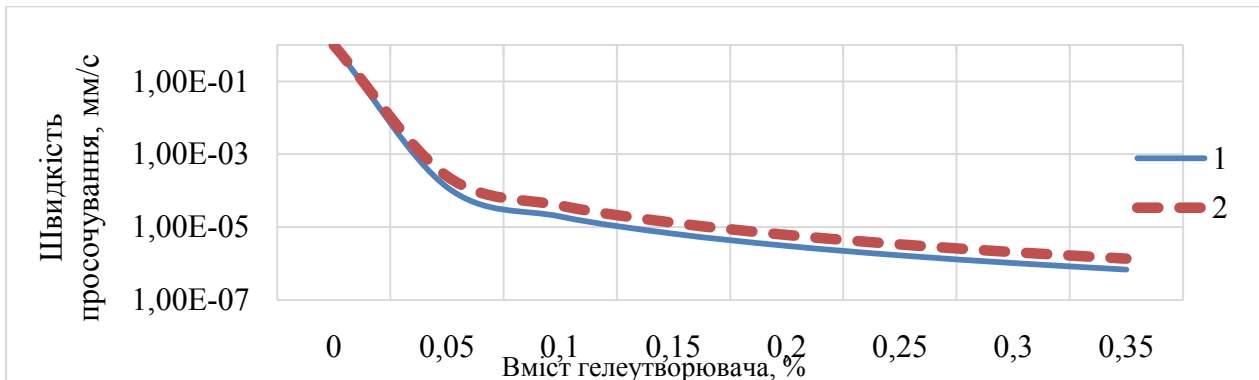


Рисунок 5 – Залежність швидкості дренажу крізь пористе середовище сміттєзвалища від процентного вмісту гелеутворювача, де: 1 – суміш гелеутворювача з водою; 2 – суміш гелеутворювача з водою з добавкою ПАВ

Досліджували проникнення водного розчину полімерного гелеутворювача ЕСОFLOC А-07, сумісного з ПАВ та мінеральними високодисперсними добавками, фракційності 20...60 меш, з концентрацією у воді від 0,025 до 0,3 % (далі – гідрогель) у товщину пористого тіла соснової деревини фракційністю 3...15 мм та товщиною 1,5 мм. Визначали час займання дослідних зразків соснової деревини у кількості 4,5 г, розміщених у металевому деку зі співвідношенням його

висоти та зовнішнього діаметра як 1:2. Наносили 50 г вогнегасного розчину, давали витримку протягом 30 с, зважували та розміщували над полум'ям газової горілки (рис. 6 а,б) та фіксували час можливого займання. Визначений час займання сухої деревини склав 40 с, деревини, обробленої водою, – 135 с. Збільшення концентрації гелю у розчині підсилює захисний ефект.

Відомо [11], що у разі використання розчину з концентрацією гелю 0,025% та

вище починає збільшуватися величина умовної полімерної плівки, а частинки гелю, наповнені водою, під дією полум'я починають повільно зменшуватися у розмірах з утворенням захисної плівки, звільняючи воду, яка випаровується, займання не відбувається. Водночас температура на поверхні зразка не перевищує 100 °С за температури полум'я 800–850°С.

На рис. 6 наведено фото процесу визначення часу захисту деревини, обробленої розчином полімерного гелеутворювача, та загальний вид деревини у разі перебування під впливом полум'я. На рис. 6 с можна побачити частки гелю, який ще зберіг свої властивості утримуватися на поверхні разом із водою. Таким чином, водний розчин із концентрацією гелю більш ніж 0,03 % можна застосовувати як захисну речовину.



a)



b)



c)



d)

Рисунок 6 – Процес визначення часу займання деревини, обробленої розчином полімерного гелеутворювача

а) вид деревини після 60 с дії полум'я; в) вид деревини після 400 с дії полум'я; с) вид зверху на деревину після 500 с дії полум'я; d) вид знизу на деревину після 500 с дії полум'я

У разі застосування (використання) гелю під час гасіння вогнищ унеможливується повторне загоряння (рис. 6 с,d) навіть у разі подальшої дії відкритим полум'ям. Частки гелю перекривають повітряні канали, блокуючи доступ повітря через тіло, всередині тіла та на його поверхні температура не перевищує 80–100°С.

Проведено дослідження виявлення ефективності застосування гелевих розчинів під час гасіння пожеж порівняно з водними розчинами. У табл. 2 наведені результати експериментальних досліджень з визначення вогнегасної ефективності вогнегасних розчинів під час гасіння модельних вогнищ класу А для різних типів вогнегасної речовини.



Таблиця 2 – Результати експериментів щодо гасіння модельних вогнищ 1А та 2А

№ складу	Вага до, г	Вага після, г	Витрата, г	Вода, %	ПАВ, %	Полім. гелеутв. %	Тип вогнища	Збито полум'я, с	Умовні витрати на биття полум'я, г	Ефективність гасіння	Результат
1	13720	8320	5400	99.5	0.2	0.3	1А	32	2880	223.44	Погаш.
2	13620	7050	6570	99.8	0.2	0	1А	57	6242	103.10	Погаш.
3	13740	5845	7895	98.7	1	0.3	2А	20	1316	489.04	Погаш.
4	13340	4760	8580	94.0	6	0	2А	90	6435	100.00	Погаш.

З огляду на отримані дані побудовано залежності умовної маси витраченої водної вогнегасної речовини (далі – ВВР) на ліквідацію відкритого полум'я в перерахунку на модельне

вогнище 2А та відносної ефективності ВВР під час ліквідації відкритого полум'я в перерахунку на модельне вогнище 2А відповідно до номера складу вогнегасної речовини (рис. 7 та рис. 8).

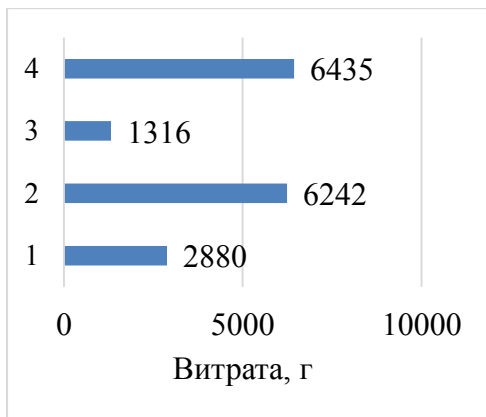


Рисунок 7 – Умовна маса витраченої ВВР на ліквідацію відкритого полум'я в перерахунку на модельне вогнище 2А відповідно до номера складу вогнегасної речовини

Рисунок 8 – Відносна ефективність ВВР під час ліквідації відкритого полум'я в перерахунку на модельне вогнище 2А відповідно до номера складу вогнегасної речовини

**Висновки та напрями подальших досліджень.** Отримані результати досліджень вказують, що додавання до водних розчинів гелеутворювальних сполук водопоглинального полімеру типу Ecosfloc F-07 підвищує вогнегасну ефективність розчину. Отже, під час гасіння пожеж полігонів побутових відходів, змінюючи концентрацію (в'язкість) гелю у розчині, можна регулювати глибину проливу вогнегасної речовини, фіксуючи її на встановленій відстані та ізолюючи від кисню прошарки, що лежать нижче, та цим підвищити ефективність гасіння. Також

слід відзначити утворення захисних плівок на поверхнях під час гасіння. На рис. 9 наведено погашене модельне вогнище з утвореними на поверхнях захисними плівками та частками гідрогелю, частково наповненими водним розчином. Отримані результати свідчать про можливість застосування водних вогнегасних розчинів з використанням в'язких гідрогелів під час гасіння твердих речовин в атмосферних умовах без зміни температури і додавання антирозчинників.



Рисунок 9 – Відкладання краплин гідрогелю та утворення полімерної плівки на поверхні модельного вогнища під час гасіння розчином гідрогелю

Експериментально доведено, що порівняно з водою вогнегасні розчини на основі модифікованих систем та нових технологій їх продукування мають ряд переваг, що полягають в суттєвому збільшенні коефіцієнта ефективного використання води внаслідок адгезії гелевих краплин до поверхонь, підвищенні вогнезахисної дії через утворення під час подавання на полум'я пористого шару або плівки. Зазначене ускладнює займання та захищає горючий матеріал через свою низьку теплопровідність та ізолювання від доступу кисню повітря, що важливо у разі гасіння поверхневих пожеж класу А. Залежно від фізико-хімічних показників, що визначають призначення, гідрогель можливо класифікувати як вогнегасну речовину або засіб вогне-, теплозахисту. Для гасіння пожеж потрібна одна концентрація, для вогне-, теплозахисту – інша. Концентрація також залежить і від характеристик вогнища пожежі. Гідрогель також можна застосовувати як профілактику для захисту поверхонь під час наближення пожежі, захищати ці місця від загоряння.

Змінюючи концентрацію гелеутворювальних добавок можна варіювати в'язкістю, випаровуваністю розчину та глибиною проникнення вогнегасної речовини до середовища. Чим більше в'язкість гідрогелю, що стікає з вертикальної стінки, тим товща гідрогелева плівка і менша його витрата. Порівняно з водою ефективність використання гідрогелів у 2 ... 4 рази вища через підвищення коефіцієнта

використання води та утворення у разі гасіння поверхневих плівок.

Як нову вогнегасну речовину пропонується розглянути водний розчин полімерної гелеутворювальної речовини типу ECOFLOC A-07 з додаванням поверхнево-активних речовин. Використання розчину гідрогелю у концентрації до 0,3 % у 2...3,5 рази підвищує коефіцієнт використання води порівняно із застосуванням тільки води. Наявність у складі гідрогелю калію призводить не тільки до збільшення коефіцієнта використання води до 5,4 раза, а й дає можливість поєднати ефективне охолодження осередку пожежі внаслідок збільшення ефективності використання води з інгібувальним ефектом через використання поташу.

Вогнегасний склад з добавкою полімерного гідрогелю під дією температури утворює полімерну плівку, яка збільшує адгезію як до палаючої, так і до поверхні, що захищається від загоряння, водночас ізолює її від доступу кисню, перешкоджаючи стіканню вогнегасної речовини, має підвищені вогнегасні властивості та суттєво зменшує втрати вогнегасної речовини.

Під час гасіння великих пожеж на полігонах ТПВ характерним є явище повторного займання раніше погашених ділянок під дією теплових потоків від непогашених ділянок пожежі. У разі використання гелю під час гасіння вогнищ загоряння ймовірно виключення повторного загоряння, навіть за подальшої дії відкритим полум'ям.

Таким чином, перспективним є використання водного гелевого розчину для гасіння пожеж полігонів ТПВ, однак для його практичного застосування необхідно провести додаткові дослідження з подавання гідрогелів у натурних умовах. Потрібно дослідити залежності фізико-хімічних властивостей та вогнегасної здатності гідрогелю у разі зміни фракційності його складових, додавання до робочого розчину антикоагулянтів та визначення терміну його придатності до використання. Також потрібно розробити рекомендації щодо практичного застосування гідрогелю.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про Основні напрями державної політики України у галузі охорони довкілля, використання природних ресурсів та забезпечення екологічної безпеки : постанова Верховної Ради України від 05.03.1998 р. № 188/98-ВР. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/188/98-вр#Text> (дата звернення : 21.10.2022).
2. Про затвердження Методичних рекомендацій з визначення морфологічного складу твердих побутових відходів : наказ Міністерства з питань житлово-комунального господарства України від 16.02.2010 р. № 39. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0039662-10#Text> (дата звернення : 21.10.2022).
3. Полігони твердих побутових відходів. Основні положення проектування : ДБН В.2.4-2-2005 [Чинний з 01.01.2006]. Київ: Держбуд України, 2005. 32 с.
4. Звіт про науково – дослідну роботу (заключний) «Провести дослідження та розробити спосіб використання заливальних карбамідних поропластів для гасіння пожеж твердих речовин методом ізоляції» / Нікулін О.Ф., Кодрик А.І., Новіков О.В., Тітенко О.М. К.: УкрНДІЦЗ ДСНС України. 2017. 171 с. № ДР 0116U001821.
5. Пожежі на звалищах, їх величина, характеристики та локалізація. Підготовлено для Федерального агентства з надзвичайних ситуацій та пожеж адміністрації США. Національний центр даних щодо пожеж. 05.2002.
6. Бобков С. А., Бабурын А. В., Комраков П. В. Физико-химические основы развития и тушения пожаров. Москва. 2014. 214 с.
7. Гогланд В., Брамруд Т., Персон И. Физические, биологические и химические эффекты несортированных фракций твердых промышленных отходов в хранилище отходов топлива. Управление отходов и исследования. 14. 1996. С. 197–210.
8. Bowes P. C. Самонагревание : оценка и контроль рисков. Amsterdam : WF Бринтон, 1984.
9. Андрюшкин А. Ю. Эффективность применения вязких гидрогелей при тушении горящих твердых веществ. Пожаровзрывобезопасность. 2020. Т.29. №2. С. 53–62. doi :10.18322 / PVB.2020.29.02.53-62F.
10. Халяпов Р. Гидрогель для пожаротушения ГП-1 на основе сополимера акриловой кислоты и стирола. ISSUU : вебсайт. URL: [https://issuu.com/antonberezovskiy/docs/2011\\_12\\_31\\_halyarov/](https://issuu.com/antonberezovskiy/docs/2011_12_31_halyarov/) (дата звернення : 24.10.2022).
11. Звіт про науково-дослідну роботу (заключний) «Наукове обґрунтування підвищення ефективності гасіння пожеж за рахунок модифікації складів водних вогнегасних речовин та способів їх подавання» / Кодрик А. І., Тітенко О. М., Борисов А. В., Мороз А. І. К. : ІДУ НДЦЗ ДСНС України. 2021. 239 с.
12. Kodrik A. Theoretical Prerequisites for Creating a Fire-Extinguishing Solution Based on Water-Absorbing Polymer Ecoflocf-07 for Extinguishing Fires in Ecosystems. et al. Key Engineering Materials. 2022. Vol. 927. P. 87–104. doi.org/10.4028/p-647f1v.
13. Ерємина Р. М., Скворцов А. И., Мутыгуллина А. А Экспериментальные задачи общего физического практикума по молекулярной физике и термодинамике. Процессы переноса. Жидкости и твердые тела. Казань : Казан. ун-т, 2015. 42 с.
14. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. Т. 2. №.1. М. : «Наука». 1960. 600 с.
15. Леонтьев Н.Е. Основы теории фильтрации. М. : Изд-во ЦПИ при механико-математическом факультете МГУ. 2017. С. 24–29.

## REFERENCES

1. Pro Osnovni napriamy derzhavnoi polityky Ukrainy u haluzi okhorony dovkillia, vykorystannia pryrodnykh resursiv ta zabezpechennia ekolohichnoi bezpeky [About the main directions of the state policy of Ukraine in the field of environmental protection, use of natural resources and ensuring environmental safety]: postanova Verkhovnoi Rady Ukrainy vid 05.03.1998 r. № 188/98-VR. *Ofitsiyni veb-portal parlamentu Ukrainy*. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/188/98-вр#Text> [in Ukrainian].
2. Pro zatverdzhennia Metodychnykh rekomendatsii z vyznachennia morfolohichnoho skladu tverdyykh pobutovykh vidkhodiv [On the approval of Methodological recommendations for determining the morphological composition of solid household waste]: nakaz Ministerstva z pytan zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy vid 16.02.2010 r. № 39. *Ofitsiyni veb-portal parlamentu Ukrainy*. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0039662-10#Text> [in Ukrainian].
3. Polihony tverdyykh pobutovykh vidkhodiv. Osnovni polozhennia proektuvannia [Solid household waste landfills. Basic provisions of design]. (2005). DBN V.2.4-2-2005 [Chynnyi z 01.01.2006]. Kyiv: Derbud Ukrainy [in Ukrainian].
4. Nikulin, O. F., Kodryk, A. I., Novikov, O. V., Titenko, O. M. (2017). Zvit pro naukovo – doslidnu robotu (zakliuchnyi) «Provesty doslidzhennia ta rozrobyty sposib vykorystannia zalyvalnykh karbamidnykh poroplastiv dlia hasinnia pozhezh tverdyykh rechovyn metodom izoliatsii» [Report on scientific and research work (final) «Conduct research and develop a method of using pouring urea porous plastics for extinguishing fires of solid substances by the isolation method»]. K.: UkrNDITSZ DSNS Ukrainy. № DR 0116U001821 [in Ukrainian].
5. Pozhezhi na zvalyshchakh, yikh velychyna, kharakterystyky ta lokalizatsiia [Landfill fires, their size, characteristics and localization]. (Traven 2002). Pidhotovleno dlia Federalnoho ahentstva z nadzvychnykh sytuatsii ta pozhezh administratsii SShA. Natsionalnyi tsentr danykh shchodo pozhezh [in Ukrainian].
6. Bobkov, S. A., Baburn, A. V., Komrakov, P. V. (2014). Fyzyko-khymycheskye osnovy razvytyia y tusheniya pozharov [Physico-chemical basis of fire development and extinguishing]. Moskva [in Ukrainian].
7. Hohland, V., Bramrud, T., Person, Y. (1996). Fyzycheskye, byolohycheskye y khymycheskye efekty nesortirovannykh fraktsiy tverdyykh promyshlennykh otkhodov v khranylyshche otkhodov toplyva [Physical, biological and chemical effects of unsorted fractions of solid industrial waste in fuel waste storage]. *Upravlenye otkhodov y yssledovaniya*, 14, 197–210 [in Russian].
8. Bowes, P. C. (1984). Samonahrevanye: otsenka y kontrol ryskov [Self-heating: risk assessment and control]. Elsevier, Amsterdam, WF Brynton [in Ukrainian].
9. Andriushkyn, A. I. (2020). Efektivnost prymeneniya viazkykh hydrohelei pry tushenyy horiashchykh tverdyykh veshchestv [Effectiveness of application of viscous hydrogels in extinguishing burning solid substances]. *Pozharovzryvobezopasnost*, 29, (2), 53-62. doi:10.18322/PVB.2020.29.02.53-62F [in Russian].

10. Khaliapov, R. Hydrogel dlia pozharotushenyia HP-1 na osnove sopolymera akrylovoi kysloty y styrola [Hydrogel for fire extinguishing GP-1 based on a copolymer of acrylic acid and styrene]. *ISSUU: vebсайт*. Retrieved from [https://issuu.com/antonberezovskiy/docs/2011\\_12\\_31\\_halyapov/](https://issuu.com/antonberezovskiy/docs/2011_12_31_halyapov/) [in Russian].
11. Kodryk, A. I., Titenko, O. M., Borysov, A. V., Moroz, A. I. (2021). Zvit pro naukovo-doslidnu robotu (zakliuchnyi) «Naukove obruntuвання pidvyshchennia efektyvnosti hasinnia pozhezh za rakhunok modyfikatsii skladiv vodnykh vohnehasnykh rehovyn ta sposobiv yikh podavannia» [Report on research work (final) «Scientific substantiation of increasing the efficiency of extinguishing fires due to the modification of the compositions of water fire extinguishing substances and their delivery methods»]. K.: IDU NDTsZ DSNS Ukrainy [in Ukrainian].
12. Kodrik, A. (2022). Theoretical Prerequisites for Creating a Fire-Extinguishing Solution Based on Water-Absorbing Polymer Ecoflocf-07 for Extinguishing Fires in Ecosystems. et al. *Key Engineering Materials*, 927, 87–104. doi.org/10.4028/p-647f1v.
13. Erëmyna, R. M., Skvortsov, A. Y., Mutshullyna, A. A. (2015). Экспериментальные задачи обshchego fizycheskogo praktikuma po molekuliarnoi fizyke y termodinamike. Protsessy perenosa. Zhydkosty y tverdye tela [Eksperimentalnie zadachi obshchego fizycheskogo praktikuma po molekulyarnoi fizike i termodinamike. Protsessy perenosa. Zhidkosti i tverdie tela]. Kazan: Kazan. un-t [in Russian].
14. Abramovych, H. N. (1960). Prykladnaia hazovaia dynamyka [Applied gas dynamics]. 2(1), M: «Nauka» [in Russian].
15. Leontev, N. E. (2017). Osnovy teoryy fyltratsyy [Fundamentals of Filtration Theory]. M: Yzd-vo TsPY pry mekhanyko-matematicheskom fakultete MHU [in Russian].

## POSSIBILITIES OF USING POLYMER GEL SOLUTIONS WHILE EXTINGUISHING LANDFILLS AND SOLID HOUSEHOLD WASTE LANDFILLS

**A. Kodryk, O. Titenko, A. Borysov, O. Moroz, O. Tymoshenko, I. Stylyk**

*Institute of Public Administration and Research in Civil Protection, Ukraine*

**KEYWORDS: ANNOTATION**

labor safety, solid waste landfills, fire extinguishing, polymer gelling compounds, viscosity of substances, gaseous and liquid substances, structure of landfill, today's issue.

The dangers associated with the elimination of fires and emergency situations at the objects of landfills and household waste landfills are considered. An analysis of domestic and foreign literary sources was carried out according to the direction of the research. It was found that the characteristics of quenching of these objects related to the composition and structure of combustible materials, which can form many centers of combustion and have the ability to re-ignite, have a relatively low value of the fire load compared to man-made fires. Air that comes from the environment through the porous structure of the landfill takes an active part in supporting the combustion process. It is noted that the existing landfill extinguishing technologies are not effective. The process of exiting combustion products throughout the porous body, which is the structure of the landfill, was considered, which provided information about the spatial branching of heated gas flows, on the basis of which a scheme for the passage of air flows from the exits was developed. Possible ways of increasing the efficiency of isolation and fire extinguishing of household waste landfills are indicated. As a new fire-extinguishing substance, it is proposed to consider an aqueous solution of a polymeric gel-forming substance of the ECOFLOC A - 07 with the addition of surface-active substances. The use of a hydrogel solution in a concentration of up to 0,3% increases the ratio of water use by 2...3.5 times compared to the use of water itself. Using the gel while extinguishing fires, re-ignition is excluded, even with further exposure of open flame. The gel particles blockade the air channels, blocking the access of air through the body, the temperature in the middle of the body and on its surface does not exceed 80-100°C. The effectiveness of the use of hydrogels in terms of their consumption and the thickness of hydrogel films of different viscosities in comparison with water is indicated. By changing the concentration of gel-forming additives, you can vary the viscosity, evaporation rate of the solution, and the depth of penetration of the fire-extinguishing agent into the medium. Compared to water, the efficiency of using hydrogels is 2 ... 4 times higher due to the increase of the coefficient of water use and the formation of surface films during extinguishing. The presence of potassium salts in the hydrogel leads not only to an increasing of water using coefficient to 5.4 times, but also makes it possible to combine effective cooling of the fire source by increasing the efficiency of water use with an inhibitory effect. The fire-extinguishing solution with the addition of polymer hydrogel under the influence of temperature forms a polymer film that increases adhesion both to the burning part and to the surface that is protected from ignition, at the same time isolates it from oxygen access, preventing the intensive flow of the fire-extinguishing substance, partially filling the porous structure of the landfill, has increased fire-extinguishing properties and significantly reduces the loss of fire-extinguishing substance. The results obtained during the research indicate the possibility of using aqueous fire extinguishing solutions with the use of viscous hydrogels while extinguishing of solid substances in atmospheric conditions, but further research is needed.

УДК 614.84

## МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2.134-142>

Несенюк Л. П. \*, ORCID iD 0000-0002-7796-7952

Савченко О. В., ORCID iD 0000-0002-4140-3055

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

Нікулін О. Ф., ORCID iD 0000-0001-9126-0681

\*E-mail: lyuba\_n@ukr.net

*Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Україна*

### ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

*Надійшла до редакції: 10.11.2022*

*Пройшла рецензування: 21.11.2022*

### КЛЮЧОВІ СЛОВА:

пожежна безпека, протипожежний захист, індивідуальний пожежний ризик, системи протипожежного захисту, ефективність функціонування систем протипожежного захисту, оцінювання ефективності

### АНОТАЦІЯ

У роботі наведено статистичні дані про пожежі в Україні за 2021 рік та їх наслідки, що містять: кількість загиблих та травмованих людей (в тому числі дітей), прями та побічні збитки. Використано аналітичні методи, зокрема комплексний аналіз і узагальнення раніше виконаних робіт. Здійснено аналіз наукових джерел та досліджень щодо теоретичних методів оцінювання надійності технічних систем і переліку показників надійності, які впливають на ефективність функціонування технічних систем; наведено класифікацію показників надійності за властивостями, що визначають надійність технічних систем. Зображено схему процедури дослідження ефективності технічної системи. Показано, що найбільш застосовними на практиці під час оцінювання ефективності функціонування технічних систем є ймовірнісні методи, деталізація яких можлива з використанням статистичних даних. Наведено математичні моделі законів розподілів, які дають змогу реалізувати ймовірнісні методи під час оцінювання ефективності функціонування систем протипожежного захисту, та проаналізовано сфери їх застосування. Досліджено переваги та недоліки під час використання методів аналізування ефективності технічних систем, а саме – ймовірнісного розподілу, біноміального розподілу, нормального розподілу, логарифмічно-нормального розподілу, експоненційного розподілу, розподілу Вейбула. Показано, що ймовірність (коефіцієнт) впливу систем протипожежного захисту на значення індивідуального пожежного ризику також можна встановити із використанням польових методів моделювання. Розглянуто підходи щодо оцінювання ймовірності ефективного функціонування із використанням теоретичних методів як окремих видів систем протипожежного захисту, так і їх спільних різних комбінацій. Сформульовано висновки та напрями подальших досліджень.

**Постановка проблеми.** За 12 місяців 2021 року в Україні зареєстровано 79 457 пожеж. Загинуло внаслідок пожеж 1 853 людини, у тому числі 25 дітей, 1 383 особи отримали травми, з них 90 – це діти. Прямі збитки від пожеж склали понад 3,2 млрд грн, побічні збитки – понад 10,2 млрд грн. Знищено та пошкоджено 23 061 будівлю та споруду [1].

У роботі [2] доведено необхідність удосконалення методології оцінювання індивідуального пожежного ризику через обґрунтування коефіцієнтів ефективності функціонування систем протипожежного захисту. Для досягнення поставленої мети важливо підтвердити ефективність, надійність та апробованість методу дослідження, реалізація якого дасть змогу обґрунтувати коефіцієнти ефективності функціонування систем протипожежного

захисту. Очевидно, що для розв'язання такої задачі слід використати теоретичні методи надійності технічних систем, які зазвичай оперують такими характеристиками, як надійність, міцність, швидкодія, безвідмовність, довговічність, збереження, ремонтотрудоздатність тощо. Питання надійності технічних систем досліджували такі вчені, як М. Васильєв, Ф. Демехін, Р. Шубін, А. Ширшиков, A. Havtzell, S. Arney, D. Tonner та інші. Але в їхніх роботах поза увагою залишилися питання оцінювання ефективності функціонування систем ППЗ та їх впливу на рівень індивідуального пожежного ризику. Отже, питання обґрунтування вибору математичних моделей, за допомогою яких можливо обґрунтувати коефіцієнти впливу систем протипожежного захисту на рівень індивідуального пожежного ризику, є актуальною науково-технічною задачею.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Основним завданням під час проєктування будь-якої технічної системи є підвищення ефективності та якості, а отже й поліпшення таких характеристик технічної системи, як надійність, міцність, швидкодія тощо. На системи протипожежного захисту, як і на інші технічні системи, поширюються вимоги щодо їх ефективності. Водночас ефективність їх функціонування має оцінюватися за допомогою детерміністичних методів [3].

Наявні методи для визначення ефективності проєктованих систем протипожежного захисту використовують апроксимаційні моделі, побудовані на основі спеціальних розділів теорії ймовірностей та математичної статистики [4]. Ці моделі розробляють у припущенні, що процес експлуатації

визначається зовнішніми причинами та залежить від так званого внутрішнього стану самої системи. Водночас розглядається умова потенційної можливості відмови у будь-якому компоненті систем. Насамкінець це призведе до зниження надійності системи загалом, що вплине на процес її експлуатації та рівень якості її функціонування [5].

Використання такого підходу до оцінки рівня пожежної безпеки об'єкта дає змогу обґрунтовано (за кількісним критерієм) вибрати раціональну структуру системи протипожежного захисту об'єкта [6]. Водночас забезпечення пожежної безпеки об'єкта здійснюється через розгляд та послідовну оцінку різних альтернативних варіантів систем протипожежного захисту та їх комбінацій [7]. Таким чином, враховуються вимоги, що визначають рівень пожежної безпеки об'єкта, показники якості функціонування та економічності зазначеної системи. Створюється можливість розглянути ефективність впливу як окремої системи протипожежного захисту, так і їх комбінацій із урахуванням [8].

Таким чином, під час оцінювання ефективності функціонування систем протипожежного захисту в основу можуть бути покладені критерії щодо забезпечення виконання заданих функцій відповідною системою протипожежного захисту [6–7].

Процедура дослідження надійності технічної системи наведена у роботах [6–7], а схема процедури дослідження ефективності технічної системи – на рис. 1. Використовуючи зазначену процедуру, можна проводити оцінювання, в тому числі ефективності функціонування систем протипожежного захисту.

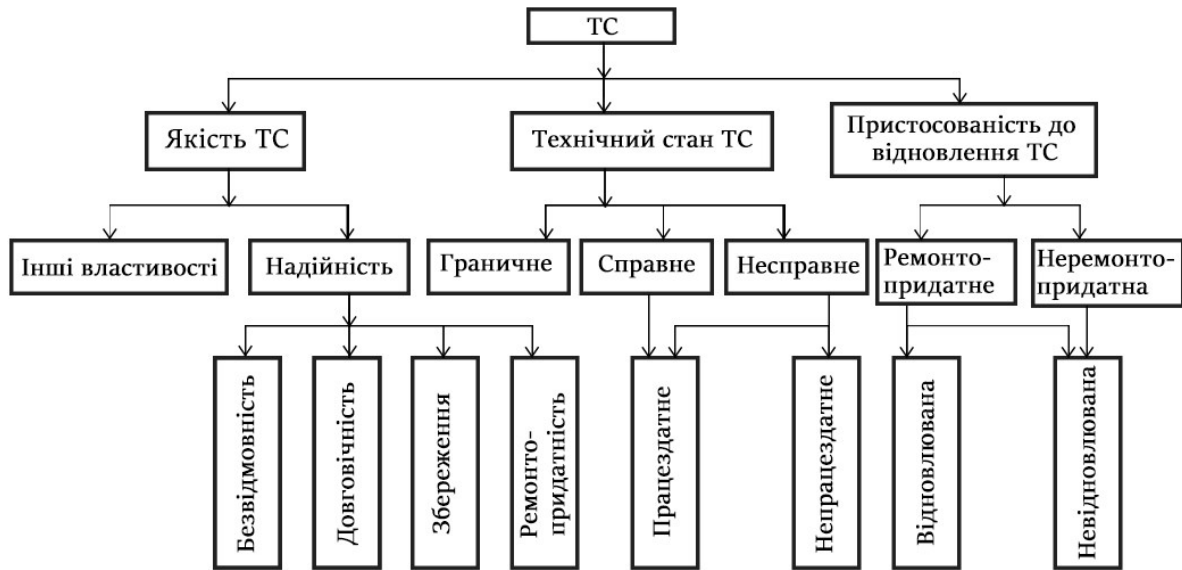


Рисунок 1 – Схема процедури дослідження ефективності технічної системи

На практиці розрахунок показників технічних систем загалом проводять методами, заснованими на систематичних даних.

Такі методи оцінювання надійності технічної системи дають змогу кількісно показати ефективність функціонування як окремої системи протипожежного захисту, так і їх комбінацій на підставі вимог до рівня протипожежного захисту об'єкта загалом. Статистична теорія надійності є складовою більш загального підходу до розрахункової оцінки надійності технічних систем, в якому відмови розглядають як результат взаємодії системи із рівнем протипожежного захисту об'єкта. Отже, методи статичної теорії базуються на встановленні впливу функціонування відповідної системи протипожежного захисту на наслідки від пожежі для відповідних об'єктів на підставі статистичних даних. Тобто реалізація такого підходу здійснюється за схемою:

«система протипожежного захисту – наслідок від пожежі порівняно з наслідком для аналогічного об'єкта без системи» протипожежного захисту.

Апробація теоретичних даних щодо ефективності функціонування систем протипожежного захисту, отриманих із використанням ймовірно-статистичних методів, можлива через експериментальне експлуатування відповідної системи протипожежного захисту, підконтрольне експлуатування [8–9] або через проведення експериментальних досліджень (випробувань).

У роботі [10] надана класифікація показників надійності технічних систем, яка наведена у табл. 1.

Використовуючи зазначені показники надійності або їх довільну комбінацію, можливо здійснювати оцінювання ефективності функціонування систем протипожежного захисту.

Таблиця 1 – Класифікація показників надійності за властивостями виробів, що характеризують надійність

Властивості, що характеризують надійність	Найменування показника	Позначення
Безвідмовність	Імовірність безвідмовної роботи	$P(t)$
	Гамма-відсотковий наробіток до відмови	$T_{\gamma}$
	Середнє напрацювання до відмови	$T_{cp}$
	Середнє напрацювання на відмову	$T_Q$
	Інтенсивність відмов	$\lambda(t)$
	Параметр потоку відмов	$\omega(t)$
	Опосередкований параметр потоку відмов	$\varpi(t)$
Довговічність	Гамма-відсотковий ресурс	$T_{py}$
	Середній ресурс	$T_p$
	Гамма-відсотковий термін служби	$T_{слу}$
	Середній термін служби	$T_{сл}$
Збереженість	Середній термін зберігання	$T_c$
	Гамма-відсотковий термін зберігання	$T_{cy}$
	Призначений термін зберігання	$T_{сн}$
	Встановлений термін збереження	$T_{cy}$
Ремонтпридатність	Середній час відновлення	$T_v$
	Ймовірність відновлення	$P_3(t_B)$
Комбінація властивостей	Коефіцієнт готовності	$K_r$
	Коефіцієнт оперативної готовності	$K_{o,r}$
	Коефіцієнт технічного використання	$K_{т,в}$

### Формулювання мети статті.

Метою статті є проведення аналізу джерел та методів оцінювання ефективності функціонування систем протипожежного захисту.

Задачі дослідження:

- провести аналіз джерел щодо ефективності функціонування систем ППЗ;
- здійснити аналіз методів оцінювання ефективності функціонування СПЗ;

- запропонувати математичні моделі для оцінювання коефіцієнта впливу систем протипожежного захисту на параметри індивідуального пожежного ризику.

Об'єкт дослідження – оцінювання ефективності технічних систем за допомогою теоретичних методів.

Предмет дослідження – параметри оцінювання ефективності технічних систем у складі математичних моделей теоретичних методів.

**Методи дослідження.** В роботі використано аналітичні методи, зокрема комплексний аналіз і узагальнення раніше виконаних робіт щодо методів оцінювання ефективності функціонування технічних систем та їх надійності.

### Виклад основного матеріалу

**дослідження.** Як вже зазначалося, одним із підходів щодо оцінювання ефективності функціонування систем протипожежного захисту є ймовірнісні методи. Ймовірнісні методи математично можуть бути виражені через закони розподілу, а саме – ймовірнісний розподіл, біноміальний розподіл, нормальний розподіл, логарифмічно-нормальний розподіл, експоненційний розподіл, розподіл Вейбула.

Ймовірнісні закони розподілу [11], що використовуються у розрахунках надійності та можуть бути використані для оцінювання ефективності функціонування систем протипожежного захисту, засновані на розподіленні випадкової величини, що може бути наведено як функцію розподілу  $F(t)$  випадкової величини  $T$ :

$$F(t) = P(T < t) = \int_{-\infty}^t f(t) dt \quad (1)$$

та функції щільності розподілу випадкової величини  $T$ :

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (2)$$



Щільність розподілу відповідає умовам:

$$f(t) \geq 0; \int_{-\infty}^{\infty} f(t) dt = 1 \quad (3)$$

Біноміальний закон розподілу використовується для розрахунку вірогідності безвідмовної роботи системи типу «*m* із *n*», тобто системи, працездатність якої зберігається, якщо з *n* її елементів працездатними виявляються будь-які *m* і більше елементів. Оскільки відмови системи «*m* з *n*» достатньо, щоб кількість справних елементів була менше *m*, ймовірність відмови системи може бути знайдена за теоремою складання ймовірностей:

$$Q = \sum_{k=0}^{m-1} C_n^k p^k (1-p)^{n-k} \quad (4)$$

Аналогічним чином можна визначити ймовірність безвідмовної роботи як суму:

$$P = \sum_{k=m}^n C_n^k p^k (1-p)^{n-k} \quad (5)$$

Під час розрахунків із формул (1.4) та (1.5) слід обрати ту, яка містить меншу кількість доданків, а потім за потреби скористатися виразом  $Q+P=1$  [11].

Нормальний розподіл випадкової величини є наслідком впливу на цю величину великої кількості рівнозначних чинників. У теорії надійності воно використовується для розрахунку показників надійності виробів у період поступових відмов унаслідок зносу та старіння. Щільність розподілу величини *T* за її нормального розподілу виражається співвідношенням

$$f(t) = \frac{1}{\delta\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(t-M_t)^2}{2\delta^2} \right] \quad (6),$$

де  $\delta$ ,  $M_t$  – середнє квадратичне відхилення та математичне очікування величини *T* відповідно. Випадковою величиною *T*, що розглядається в теорії надійності, зазвичай є напрацювання до відмови або несуча здатність.

Логарифмічно нормальний розподіл є розподілом випадкової величини, логарифм якої розподілений за нормальним законом. У теорії надійності такий розподіл використовують для

розрахунку показників надійності виробів у період настання втоми матеріалу та у період між відмовами [12].

Щільність розподілу у цьому разі описується співвідношенням:

$$f(t) = \frac{1}{st\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(1nt-\mu_t)^2}{2s^2} \right] \quad (7)$$

Експоненціальний закон розподілу, який є також і основним законом надійності, використовується для опису надійності виробу в період його нормальної експлуатації, коли поступові відмови ще не виявилися і у виробі з'являються лише раптові відмови. Ці відмови зумовлюються несприятливим збігом багатьох обставин і тому мають постійну інтенсивність. Експоненціальний закон у теорії надійності знайшов широке застосування, оскільки він простий для практичного використання. Щільність розподілу описується співвідношенням [13]:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (8)$$

Розподіл Вейбула є двопараметричним розподілом. Закон Вейбула задовільно описує розподіл напрацювання до відмови. Широке застосування закону Вейбула пояснюється тим, що цей закон є універсальним, оскільки він може описувати процеси з розподілами: нормальним, логарифмічно нормальним, експоненціальним тощо [14].

Щільність розподілу згідно із законом Вейбула виражається залежністю виду:

$$f(t) = \frac{m}{t_0} t^{m-1} \exp \left[ -\frac{t^m}{t_0} \right] \quad (9),$$

де: *m* – параметр форми кривої розподілу; *t*<sub>0</sub> – параметр масштабування.

У роботах [15–17] із використанням ймовірнісних методів проведено оцінювання оперативної обстановки в зоні відчуження Чорнобильської АЕС. У цій роботі під оперативною обстановкою розуміли чинники, що склалися у зоні відчуження за 2019 рік, які впливають на процеси реагування на загрози. Одним із важливих факторів оперативної обстановки є кількість пожежних

автомобілів ( $X$ ), що залучаються для обслуговування одного виклику. Для опису цієї випадкової величини вказані закони її розподілу [15]:

$$P\{X = k\} = a_k \quad (k = 1, 2, 3, \dots) \quad (10),$$

де  $P\{X = k\} = a_k$  – ймовірність того, що за викликом виїжджає ( $k$ ) автоцистерн.

Водночас має виконуватися умова:

$$\sum_{k=1}^{\infty} a_k = 1 \quad (11).$$

Другим важливим чинником оперативної обстановки є потік викликів пожежних підрозділів ( $P$ ) упродовж певного проміжку часу. Для опису потоку викликів пожежних підрозділів можливо використати лінійне диференціальне рівняння першого порядку [60]:

$$p_k(\tau) = \frac{(\gamma\tau)^k}{k} e^{-\gamma\tau} \quad (12),$$

де  $\gamma$  – параметр, що являє собою середнє число викликів в одиницю часу;

$\tau$  – проміжок часу;

$k$  – кількість викликів пожежних підрозділів.

Визначення потоку викликів пожежних підрозділів за певний проміжок часу можливе за допомогою закону Пуассона [18]:

$$M(P) = \gamma\tau \quad (13).$$

Рівняння (13) означає: якщо випадкова величина  $P$  розподілена за законом Пуассона, то її математичне очікування  $M(P)$  і дисперсія дорівнюють  $\gamma\tau$ .

У табл. 2 наведено результати аналізу кожного із розглянутих вище теоретичних методів аналізування ефективності технічних систем.

Таблиця 2 – Результати аналізу теоретичних методів аналізування ефективності технічних систем

Назва методу	Переваги	Недоліки
Імовірнісний розподіл	Дає змогу оцінювати ефективність як системи загалом, так і її окремих компонентів	Складний у використанні. Трудомісткий. Потребує наявності детальних статистичних даних
Біноміальний розподіл	Простота у використанні, не трудомісткий. Передбачає поділ системи на невелику кількість суттєвих елементів	Передбачає можливість наявності несправного елемента в технічній системі, що зумовлює появу розрахункової похибки
Нормальний розподіл	Базується на доступних статистичних даних щодо відмов у технічній системі	Оцінює лише один елемент технічної системи, який згідно із статистичними даними найбільш часто є несправним
Логарифмічно-нормальний розподіл	Передбачає металізування системи на найпростіші, в тому числі несуттєві елементи	Не завжди втрата працездатності окремого елемента призводить до виходу із ладу системи загалом, зазначену подію цей метод не враховує, що зумовлює похибки під час його використання
Експоненціальний розподіл	Дає змогу запобігти настанню несправностей в технічній системі	Має низькі економічні показники, оскільки може визначати несправними елементи, які ще функціонують; не дає можливість встановити показник функціональної ефективності системи, а лише функціонує як «справність-несправність технічної системи»
Розподіл Вейбула	Є універсальним, оскільки описує процеси з розподілами: нормальним, логарифмічно-нормальним, експоненціальним	Має аналогічні недоліки розподілів: нормального, логарифмічно-нормального, експоненціального

У роботі [19] наведено результати досліджень коефіцієнта впливу систем протипожежного захисту на значення індивідуального пожежного ризику із використанням польових методів моделювання.

Крім того, показано, що ймовірність (коефіцієнт) впливу систем протипожежного захисту на значення індивідуального пожежного ризику також можна встановити із використанням польових методів моделювання.

**Висновки та напрями подальших досліджень.** Таким чином, за результатами аналітичних досліджень встановлено, що оцінювання ефективності функціонування систем протипожежного захисту можна здійснювати на основі детерміністичних методів, заснованих на теорії ймовірності, зокрема ймовірно-статистичних, із подальшою апробацією отриманих результатів через проведення експерименту або підконтрольне експлуатування.

Оцінка ефективності функціонування систем протипожежного захисту може здійснюватися через оцінювання як окремої системи протипожежного захисту, так і їх комбінацією з урахуванням синергізму ефективності від їх спільної дії.

Встановлено, що ймовірнісні методи математично можуть бути виражені через закони розподілу, а саме: ймовірнісний розподіл, біноміальний розподіл,

нормальний розподіл, логарифмічно-нормальний розподіл, експоненційний розподіл, розподіл Вейбула. Кожна із зазначених математичних моделей має недоліки й переваги, але є застосовною на практиці. В роботі наведено порівняльний аналіз зазначених математичних моделей.

Надалі у дослідженнях необхідно:

- обґрунтувати переліки параметрів, які характеризують вплив систем протипожежного захисту на значення індивідуального пожежного ризику;

- обґрунтувати сценарії розвитку пожежі, які доцільно застосовувати під час визначення впливу систем протипожежного захисту на значення індивідуального пожежного ризику;

- розробити алгоритм дослідження впливу систем протипожежного захисту на значення індивідуального пожежного ризику та встановлення відповідних коефіцієнтів впливу.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аналітична довідка про пожежі та їх наслідки в Україні за 12 місяців 2021 року ІДУНДЦЗ. Київ, 2021. URL : [https://idundcz.dsns.gov.ua/files/2021/Ctatuctuka/Analychna\\_%20dovidka%20pro%20rojeji\\_12.2021.pdf](https://idundcz.dsns.gov.ua/files/2021/Ctatuctuka/Analychna_%20dovidka%20pro%20rojeji_12.2021.pdf) (дата звернення : 10.01.2022).
2. Ніжник, В. В., Савченко, О. В., Добряк, Д. О., Кравченко Н. В. Аналіз сучасного стану щодо управління індивідуальним пожежним ризиком із використанням систем протипожежного захисту. *Вчені записки таврійського національного університету імені В. І. Вернадського Серія : Технічні науки*. 2022. Т. 33(72) № 1. С. 328–334.
3. Stephen G. Badger, Thomas Johnson. 1999 Large Loss Fires and Explosions. *NFPA Journal*. November / December 2000. р. 79–82.
4. Холщевников, В. В., Серков Б. Б. Значимость автоматических систем протипожарной защиты для обеспечения безопасности людей в высотных зданиях. *Журнал Пожаровзрывобезопасность*. 2017. Т. 26. № 9. С. 44–49.
5. Фан А. Ле Н. З. Анализ мероприятий по снижению пожарной опасности в высотных жилых зданиях. *Журнал пожарной безопасности ИПБ Республики Вьетнам*. 2015. Т. 77. С. 20–23.
6. Белоусов Л., Дауэнгауэр С. Спринклерные системы водяного пожаротушения с принудительным пуском. *Алгоритм безопасности*. 2009. № 6. С. 24–27.
7. Саутин И. Концепция построения безопасной противопожарной автоматики. *Алгоритм безопасности*. 2005. № 4. С. 68–70.
8. Надійність техніки. Терміни та визначення : ДСТУ 2860-94 [Чинний від 1996-01-01]. Київ : УкрНДНЦ, 1994. 96 с.
9. Шубин Р. А., Ш951 Надёжность технических систем и техногенный риск : учебное пособие. Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. 80 с.
10. Матвеевский В. Р. Надёжность технических систем : учебное пособие. Московский государственный институт электроники и математики. М., 2002. 113 с.
11. Hartzell A. L., Silva M. G., Shea H. S. MEMS Reliability. Springer. 2011. 291 с.
12. Tanner D. M. et al. MEMS reliability: infrastructure, test structures, experiments, and failure modes. Sandia Report SAND2000-0091 2000. URL : <http://mems.sandia.gov/tech-info/doc/000091o.pdf> (last accessed : 25.10.2022).
13. Gad-el-Hak M. (ed) The MEMS Handbook. Boca Raton, FL: CRC Press. 2002.
14. Boyce B. L., Graziop J. M., Buchheit T. E., Shaw M. J. Strength distributions in polycrystalline silicon MEMS. *J. Microelectromech. Syst.* 2007. № 16(2), pp. 179.
15. Звіт про науково-дослідну роботу Дослідження впливу пожежних ризиків на комплекс заходів для уникнення або мінімізації наслідків надзвичайних ситуацій на території зони відчуження. Київ : ІДУ НД ЦЗ, 2021. 292 с.
16. Ніжник В. В., Фещук Ю. Л., Балло Я. В., Тесленко О. М., Циганков А. О. Моделювання оперативної обстановки в зоні відчуження. *Науковий вісник : Цивільний захист та пожежна безпека*. 2020. Т.26. № 1. С. 42–51.
17. Ніжник В. В., Фещук Ю. Л., Сізіков О. О., Балло Я. В., Жихарев О. П., Циганков А. О. Оцінка кореляції часу проведення пожежно-профілактичної роботи від кількості визв'язів пожежно-рятувальних підрозділів у зоні відчуження *Надзвичайні ситуації : попередження та ліквідація*. 2020. Т.4. № 2. С. 48–53.
18. Брушлинский Н. Н., Системный анализ деятельности государственной противопожарной службы : учебник. М. : МИПБ МВД России, 1998. 255 с.

19. Vadim Nizhnyk, Olesya Savchenko, Yaroslav Ballo, Valeria Nekora Theoretical Approaches to Justify the Coefficients of Influence of Fire Protection Systems on Individual Fire Risk. International Scientific Conference EcoComfort and Current Issues of Civil Engineering EcoComfort 2022. Proceedings of EcoComfort. 2022. pp 299-306 doi : 10.1007/978-3-031-14141-6\_30.

## REFERENCES

1. Analitichna dovidka pro pozhezhi ta yikh naslidky v Ukraini za 12 misyatsiv 2021 roku IDUNDTSZ. [Analytical report on recent events in Ukraine for 12 months of 2021 IDNDCZ.]. (2021). Kyiv. Retrived from [https://idundcz.dsns.gov.ua/files/2021/Ctatuctuka/Analitichna%20dovidka%20pro%20pojeji\\_12.2021.pdf](https://idundcz.dsns.gov.ua/files/2021/Ctatuctuka/Analitichna%20dovidka%20pro%20pojeji_12.2021.pdf) [in Ukrainian].
2. Nizhnik, V. V., Savchenko, O. V., Dobryak, D. O., Kravchenko, N. V. (2022). Analiz suchasnoho stanu shchodo upravlinnya individual'nym pozhezhnym ryzykom iz vykorystanniam system protypozhezhnogo zakhystu. [Analysis of the current state of individual fire risk management using fire protection systems]. *Academic notes of the Tauriyya National University named after V. I. Vernadsky Series: Technical sciences*, 1 (33(72)), 328–334. [in Ukrainian].
3. Stephen G. Badger, Thomas Johnson. (November / December 2000). 1999 Large Loss Fires and Explosions. *NFPA Journal*, p. 79–82. [in English].
4. Kholshchevnikov, V. V., Serkov, B. B. (2017). Znachimost' avtomaticheskikh sistem protivopozharnoy zashchity dlya obespecheniya bezopasnosti lyudey v vysotnykh zdaniyakh. [The importance of automatic fire protection systems for ensuring the safety of people in high-rise buildings]. *Zhurnal Pozharovzryvbezopasnost*, 9 (26), 44–49. [in Russian].
5. Fan A. Le N. Z. (2015) Analiz meropriyatiy po snizheniyu pozharnoy opasnosti v vysotnykh zhilykh zdaniyakh [Analysis of measures to reduce fire danger in high-rise residential buildings]. *Zhurnal pozharnoy bezopasnosti IPB Respubliki V'yetnam*, 77, 20–23. [in Russian].
6. Belousov, L., Dauengauer, S. (2009). Sprinklernyye sistemy vodyanogo pozharotusheniya s prinuditel'nym puskom. [Water fire extinguishing sprinkler systems with forced start]. *Algoritmy bezopasnosti*, 6, 24–27. [in Russian].
7. Sautyn, Y. (2005) Kontseptsyia postroyeniya bezopasnoi protyvopozharnoi avtomatyky. [The concept of building safe fire-fighting automation]. *Alhorytm bezopasnosti*, 4, 68–70. [in Russian].
8. Nadiynist' tekhniki. Terminy ta vyznachennya [Reliability of equipment. Terms and definitions]. (1994). DSTU 2860-94 from 1<sup>st</sup> January 1996. Kyiv: UkrNDNTS [in Ukrainian].
9. Shubin, R. A. (2012). SH951 Nadozhnost' tekhnicheskikh sistem i tekhnogennyy risk [Sh951 Reliability of technical systems and technogenic risk]. Tambov: Izd-vo FGBOU VPO «TGТУ» [in Russian].
10. Matveyevskiy, V. R. (2002). Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem [Reliability of technical systems]. M. [in Russian].
11. Hartzell, A. L., Silva, M. G., Shea, H. S. (2011). MEMS Reliability. Springer [in English].
12. Tanner, D. M. et al. (2000). MEMS reliability: infrastructure, test structures, experiments, and failure modes. Sandia Report SAND2000-0091 Retrived from <http://mems.sandia.gov/tech-info/doc/000091o.pdf>
13. Gad-el-Hak, M. (ed) (2002) The MEMS Handbook. Boca Raton, FL: CRC Press. [in English].
14. Boyce, B. L., Grazier, J. M., Buchheit, T. E., Shaw, M. J. (2007). Strength distributions in polycrystalline silicon MEMS. *J. Microelectromech. Syst.* 16(2), 179. [in English].
15. Zvit pro naukovo-doslidnu robotu Doslidzhennya vplyvu pozhezhnym ryzykiv na kompleks zakhodiv dlya unyknennya abo minimizatsiyi naslidkiv nadzvychaynykh situatsiy na terytoriyi zony vidchuzhennya [Report on research work Study of the impact of fire risks on a set of measures to avoid or minimize the consequences of emergency situations in the territory of the exclusion zone]. (2021). Kyiv: IDU ND TSZ [in Ukrainian].
16. Nizhnyk, V. V., Feshchuk, Yu. L., Ballo, Ya. V., Teslenko, O. M., Tsyhankov, A. O. (2020). Modeliuvannya operatyvnoi obstanovky v zoni vidchuzhennya [Modeling the operational situation in the exclusion zone]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, 1 (26), 42–51. [in Ukrainian].
17. Nizhnyk, V. V., Feshchuk, YU. L., Sizikov, O. O., Ballo, YA. V., Zhykharyev, O. P., Tsyhankov, A. O. (2020). Otsinka korelyatsiyi chasu provedennya pozhezhno-profilaktychnoyi roboty vid kil'kosti vyyizdiv pozhezhno-ryatuval'nykh pidrozdiliv u zoni vidchuzhennya [Evaluation of the correlation of the time of fire-preventive work with the number of exits of fire-rescue units in the exclusion zone]. *Nadzvychayni sytuatsiyi: poperedzhennya ta likvidatsiy.* 4 (2), 48–53. [in Ukrainian].
18. Brushlinskiy, N. N. (1998). Sistemnyy analiz deyatel'nosti gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby. [Systematic analysis of the activities of the state fire service]. M.: MIPB MVD Rossii [in Russian].
19. Vadim Nizhnyk, Olesya Savchenko, Yaroslav Ballo, Valeria Nekora (2022). Theoretical Approaches to Justify the Coefficients of Influence of Fire Protection Systems on Individual Fire Risk. International Scientific Conference EcoComfort and Current Issues of Civil Engineering EcoComfort 2022. Proceedings of EcoComfort 2022. doi: 10.1007/978-3-031-14141-6\_30 [in English].

## METHODS OF ASSESSING THE EFFICIENCY OF FUNCTIONING OF FIRE PROTECTION SYSTEMS

L. Nesenjuk, O. Savchenko, V. Nizhnyk, O. Nikulin

*Institute of Public Administration and Research in Civil Protection, Ukraine*

---

**KEYWORDS:**    **ANNOTATION**

fire safety, fire protection, individual fire risk, fire protection systems, effectiveness of fire protection systems, performance evaluation

The work provides statistical data on fires in Ukraine for 2021 and their consequences, including: the number of dead and injured people (including children), direct and collateral damage. Analytical methods were used, including comprehensive analysis and generalization of previously performed works. An analysis of literary sources and scientific research was carried out regarding the theoretical methods of assessing the reliability of technical systems and the list of reliability indicators, which at the same time are investigated and affect the efficiency of the functioning of technical systems; the classification of reliability indicators according to the properties characterizing the reliability of technical systems is given. The scheme of the procedure for researching the efficiency of the technical system is depicted. It is shown that the most applicable in practice when evaluating the effectiveness of the functioning of technical systems are probabilistic methods, the detailing of which is possible using statistical data. Mathematical models of distribution laws are given, which allow implementing probabilistic methods when evaluating the effectiveness of fire protection systems, and an analysis of their scope of application is carried out. The advantages and disadvantages of using methods for analyzing the efficiency of technical systems, namely probability distribution, binomial distribution, normal distribution, log-normal distribution, exponential distribution, Weibull distribution, are studied. It is shown that the probability (coefficient) of the influence of fire protection systems on the value of individual fire risk can also be established using field modeling methods. Approaches to assessing the probability of effective functioning, using theoretical methods, of both individual types of fire protection systems and their joint various combinations are considered. Formulated conclusions and directions for further research

УДК 624.012

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ ЗАЛІЗОБЕТОННОГО СХОДОВОГО МАРШУ В УМОВАХ ТЕПЛООВОГО ВПЛИВУ ПОЖЕЖІ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2.143-152>

Несен І. О.\*, ORCID iD 0000-0001-5847-4805

\*E-mail: Nesen-ua@ukr.net

*Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету служби цивільного захисту України, Україна*

### ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

*Надійшла до редакції: 08.11.2022*

*Пройшла рецензування: 16.11.2022*

### КЛЮЧОВІ СЛОВА:

залізобетонний сходовий марш, вогнестійкість, несуча здатність, метод кінцевих елементів

### АНОТАЦІЯ

Проаналізовано математичні моделі, що описують теплопровідність та напружено-деформований стан залізобетонних ходових маршів у разі впливу стандартного температурного режиму пожежі. З метою проведення дослідження поведінки залізобетонних сходових маршів під час пожежі сформульовано основні положення та припущення для здійснення розрахунку параметрів поширення тепла та напружено-деформованого стану, які мають місце у залізобетонних сходових маршах за таких умов. На основі сформульованих положень та припущень обгрунтовано відповідні математичні моделі, які базуються на застосуванні метода кінцевих елементів у нелінійній постановці, та проведено на їх основі числовий експеримент щодо виявлення особливостей розподілення температури, деформування та руйнування залізобетонного сходового маршу під впливом стандартного температурного режиму пожежі. Згідно з отриманими даними проаналізовано закономірності залежності меж вогнестійкості залізобетонного сходового маршу від його конструктивних параметрів.

### Постановка проблеми.

У сучасних умовах використовуються два основних підходи до оцінки вогнестійкості несучих будівельних конструкцій, у тому числі залізобетонних сходових маршів. Згідно із першим підходом для оцінки вогнестійкості залізобетонних сходових маршів використовуються вогневі випробування, які проводяться у разі використання зразків із відповідними реальними розмірами і навантаженнями [1–2]. На сьогодні цей підхід має перевагу у разі встановлення відповідності вогнестійкості залізобетонних сходових маршів та інших будівельних конструкцій з огляду на те, що він є наочним і дає змогу проконтролювати прямі критерії настання граничних станів втрати вогнестійкості. Недоліками такого підходу вважається високий рівень матеріальних та трудових затрат на його реалізацію.

Для реалізації другого підходу з метою оцінювання вогнестійкості використовуються розрахункові методи [3–6]. Такий підхід останнім часом отримав істотний розвиток. Водночас результати обчислень за цими методами є достовірними і вичерпними, за якими можна однозначно встановити значення меж вогнестійкості залізобетонних сходових маршів та інших елементів будівельних конструкцій без обмежень на конструктивні особливості, габаритні розміри та різні поєднання початкових і граничних умов під час постановки задач. Розрахункові методи розрахункової оцінки вогнестійкості мають ієрархічну структуру, що ранжує зазначені методи за складністю за початковими припущеннями і базовими математичними моделями. На найнижчих щаблях цієї структури перебувають спрощені методи, які засновані на використанні довідникових таблиць або номограм, що містять

конструктивні характеристики елементів вказаних будівельних конструкцій для встановлення їх відповідності необхідному класу вогнестійкості. До переваг такого підходу належать висока продуктивність, гнучкість, що дає можливість здійснити доступний інженерний аналіз вогнестійкості конструкцій. Ієрархічна структура методів розрахункової оцінки вогнестійкості залізобетонних сходових маршів нині є неповною, оскільки для них відповідні табличні дані є обмеженими. Такі дані можливо одержати у разі проведення великого обсягу стандартних вогневих випробувань. Проте, зважаючи на суттєву трудомісткість вогневих випробувань, для одержання таких табличних довідникових даних перспективним є використання методів математичного моделювання поведінки сходових маршів в умовах пожежі із використанням методу кінцевих елементів.

З огляду на викладене вище, можна зазначити, що розкриття закономірностей залежності межі вогнестійкості залізобетонних сходових маршів від їх конструктивних параметрів під тепловим впливом стандартного температурного режиму пожежі як підґрунтя для удосконалення ієрархічної системи розрахункових методів оцінки вогнестійкості залізобетонних сходових маршів на основі створення довідникових таблиць та номограм є актуальною науково-технічною задачею, що сприятиме істотному підвищенню ефективності такого підходу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В роботах [5–6] добре визначені всі основні аспекти методів розрахункової оцінки вогнестійкості залізобетонних сходових маршів. Ці методи зараз широко застосовуються та набули суттєвого розвитку. Це пов'язано із прогресом обчислювальних алгоритмів, що дають змогу враховувати всі значущі процеси та особливості залізобетонних сходових маршів, що мають місце у разі їх нагрівання під час пожежі і засновані на використанні методів. У роботах [5–6] наведено основні аспекти під час реалізації

зазначеного підходу, на якому засновані уточнені методи розрахункової оцінки вогнестійкості залізобетонних конструкцій. Проте для залізобетонних сходових маршів такий підхід розвинений недостатньо. У роботах [4; 7] наведено основні розрахункові методики, в яких використовується інженерний підхід, заснований на спрощених математичних моделях опору матеріалів. Такий підхід є основою для спрощених методів. Також слід зазначити, що вказані методи для залізобетонних сходових маршів розвинуті недостатньо. Разом обидва типи методів для розрахункової оцінки вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій складають ієрархічну систему методів, що реалізується у настанові [4]. Зазначена система охоплює всі типи конструкцій, проте залізобетонні сходові марші як окремий тип конструкцій не охоплені нею. Водночас припускається, що методи, рекомендовані для інших типів будівельних конструкцій (наприклад залізобетонних плит перекриттів), можуть використовуватись для цього. Такий стан зумовлює певну неоднозначність. З огляду на це система ієрархічних методів розрахункової оцінки залізобетонних конструкцій потребує удосконалення з урахуванням викладеного вище.

Спрощені розрахункові методи ієрархічної системи оцінки вогнестійкості залізобетонних сходових маршів, засновані на табличних довідникових даних або спеціальних номограмах, обґрунтовуються через проведення комплексу вогневих випробувань. Проте в роботі [6] показано, що перспективною альтернативою для цього є математичне моделювання із залученням методу кінцевих, яке своєю чергою є основою для уточнених розрахункових методів [5–6], що входять також як компонент у ієрархічну систему, описану в настанові [4]. Таким чином, розвиток методів розрахункової оцінки вогнестійкості залізобетонних сходових маршів є актуальною науковою задачею. З огляду на це і поставлена мета дослідження.

**Мета дослідження** полягає у дослідженні закономірностей залежності межі вогнестійкості залізобетонних маршів від їх конструктивних параметрів в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі із використанням загального теоретичного підходу на основі методу кінцевих елементів.

Об'єкт дослідження – термомеханічні процеси, що відбуваються у залізобетонних сходових маршах в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі.

Предмет дослідження – закономірності зміни значення межі вогнестійкості залізобетонних сходових маршів від їх конструктивних характеристик в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі.

**Методи дослідження.** Під час реалізації досліджень для досягнення поставленої мети був застосований комплекс дослідницьких методів, що включає: математичне моделювання на основі методу кінцевих елементів, метод аналізу, метод синтезу та метод порівняння.

**Виклад основного матеріалу.** Згідно із основними рекомендаціями щодо проведення розрахунку залізобетонних

конструкцій на вогнестійкість, наданими у роботі [3], була запропонована до розгляду конструкція залізобетонного маршу 1 ЛМ 30.12.15-4л серії 1.151.1-7. Зазначений залізобетонний марш вибрано, оскільки він несе найбільше навантаження і є таким, що має один із найбільших прольотів серед інших сходових маршів. За таких умов було визначено основні конструктивні особливості для моделювання, що надані нижче.

1. Збірний марш має внутрішнє армування.

2. Збірний марш має геометричну форму, в якій не враховані несуттєві геометричні особливості.

3. Основні конструктивні параметри мають відповідати рекомендаціям серії 1.151.1-7.

4. Закріплення залізобетонного сходового маршу з обох кінців є шарнірним відповідно до схеми (рис. 1).

5. Навантаження на сходи відповідає вимогам та може бути прийнято як 0,5 від загальної несучої здатності за врахування середнього коефіцієнта запасу.

На рис. 1. наведена відповідна конструктивна схема сходового маршу, а на рис. 2 – схема вогневого впливу та механічного навантаження.

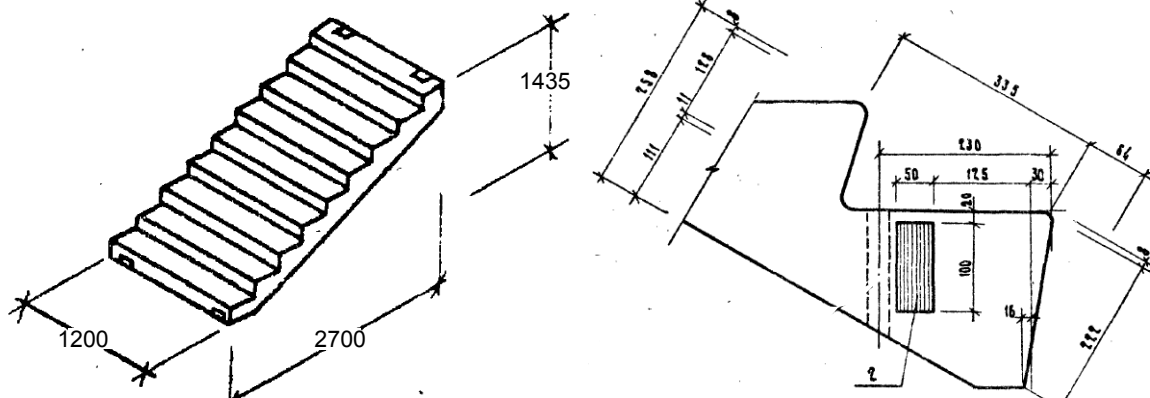


Рисунок 1 – Конструктивна схема залізобетонного сходового маршу



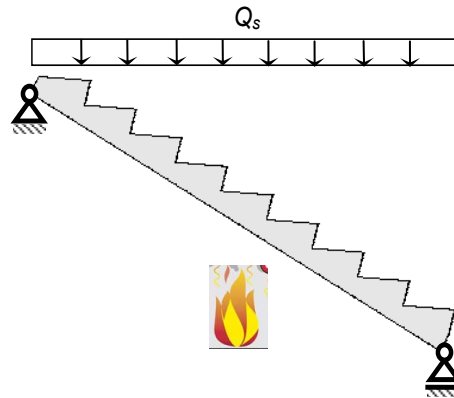


Рисунок 2 – Розрахункова схема залізобетонного сходового маршу

Конструктивні характеристики досліджуваного залізобетонного сходового маршу надані у табл. 1.

Таблиця 1 – Основні технічні параметри залізобетонного сходового маршу

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця виміру
Тип бетону	Важкий на гранітному заповнювачі	Клас С 20/25	
Густина бетону	$\rho_B$	2300	кг/м <sup>3</sup>
Гранична вологість	$u$	< 3	%
Робоча арматура нижня: • діаметр	$d_1$	Клас А400С 0,006	м
Робоча арматура верхня: • діаметр	$d_2$	Клас А400С 0,006	м

Для математичного моделювання поведінки залізобетонного сходового маршу в умовах пожежі були визначені найбільш ефективні підходи до розв'язання задач такого типу [4–6]. Проведений аналіз дав змогу прийняти основні положення й припущення, що дають змогу провести розрахунок і узгоджуються із рекомендаціями, наведеними у роботах [4; 6].

Під час проведення розрахунків був прийнятий комплекс початкових даних, який включає характеристики бетону та арматурної сталі, числові величини параметрів граничних умов, до постановки теплової задачі та задачі розрахунку несучої здатності. На рис. 3 надані температурні криві теплофізичних

характеристик бетону, рекомендовані у настанові [4] щодо розрахунку залізобетонних конструкцій на вогнестійкість. Ці характеристики визначають бетон як однорідний та ізотропний матеріал, що є прийнятним припущенням під час розв'язування такого типу задач [4–5].

На рис. 4 наведені дані щодо механічних та термомеханічних характеристик бетону, які були взяті для розрахунку згідно із рекомендаціями, наведеними у настанові [4]. Зазначені характеристики являють собою діаграми деформування бетону за різних температур його нагрівання, а також його закон температурної деформації залежно від його температури нагріву.

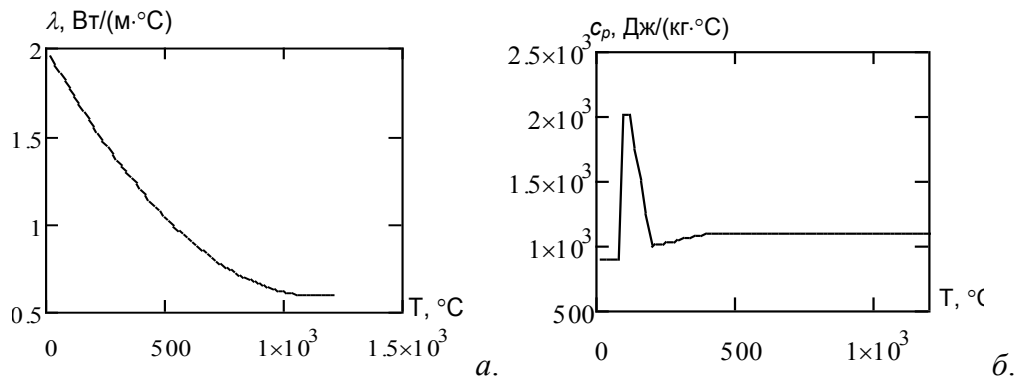


Рисунок 3 – Теплофізичні характеристики важкого бетону: коефіцієнт теплопровідності (а); питома теплоємність (б)

Аналогічні дані щодо механічних та термомеханічних характеристик арматурної сталі наведені на рис. 4 відповідно до рекомендацій настанови [4].

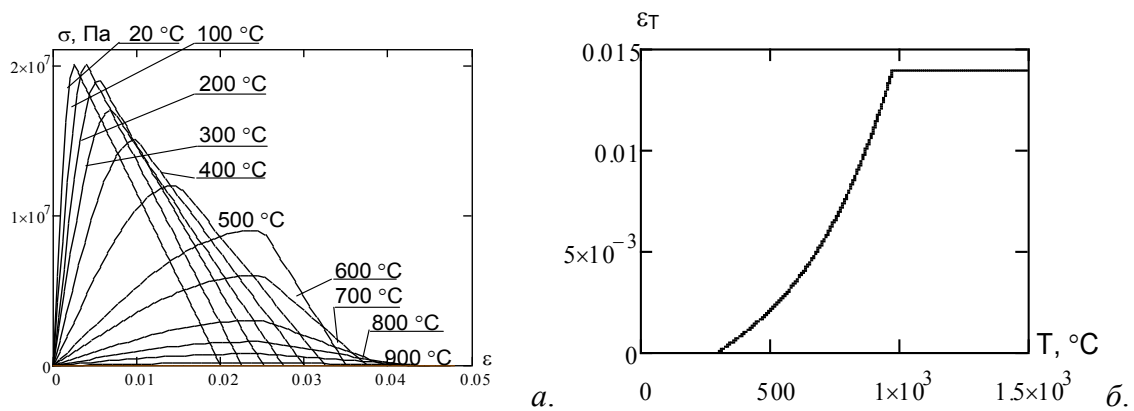


Рисунок 3 – Термомеханічні характеристики бетону: діаграми деформування (а), температурні деформації (б)

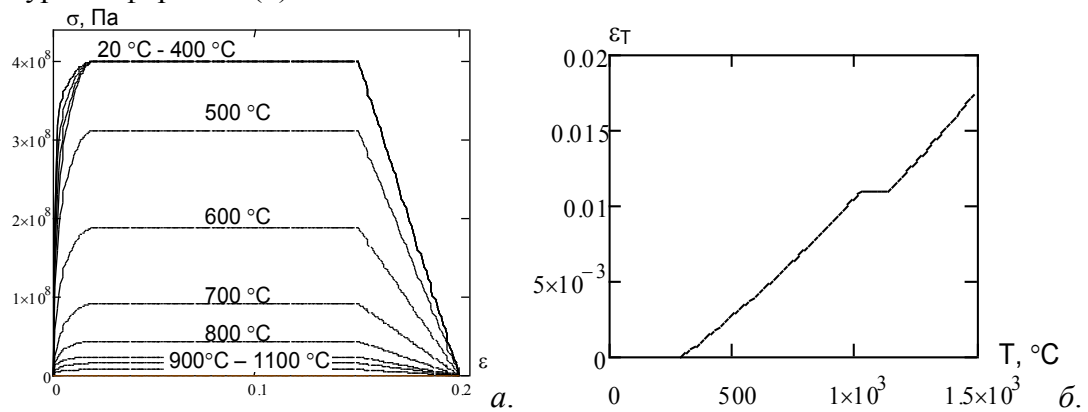


Рисунок 4 – Термомеханічні характеристики арматурної сталі А500С: діаграми деформування (а); температурні деформації (б)

Під час здійснення розрахунку застосовані математичні моделі, аспекти яких наведені у табл. 2.

Таблиця 2 – Дані щодо основних математичних моделей для здійснення розрахунків для числового дослідження поведінки залізобетонних сходових маршів в умовах пожежі

Особливість поведінки матеріалу стіни	Використана математична модель (метод)	Джерело
Теплотехнічна задача		
Теплопровідність	Рівняння нестационарної теплопровідності з апроксимацією за МКЕ	[5–6]
Граничні умови	III роду	[5–6]
Фізична нелінійність	Ітеративний метод Ньютона-Рафсона	[5–6]
Статична задача		
НДС	МКЕ	[5–6]
Пластичне деформування	Асоціативна теорія пластичного деформування Бесселінга	[5–6]
Тріщиноутворення	Складений критерій міцності бетону Віллема і Варнке	[5–6]
Нелінійність	Ітеративний метод Ньютона-Рафсона	[5–6]

Для завдання граничних умов були використані параметри згідно з чинними стандартами України щодо розрахунку будівельних конструкцій на вогнестійкість. Величини вибраних параметрів наведені у табл. 3.

Таблиця 3 – Параметри граничних умов

Характеристика	Одиниці виміру	Величина	Джерело
Параметри граничних умов теплотехнічної задачі			
Номінальний тепловий вплив		Стандартний температурний режим пожежі	
Коефіцієнт теплообміну конвекцією на обігрівній поверхні	$Вт/(м^2 \cdot К)$	25	[4]
Коефіцієнт теплообміну конвекцією на необігрівній поверхні	$Вт/(м^2 \cdot К)$	6	[4]
Ступінь чорноти бетону	-	0.7	[4]
Стала Стефана-Больцмана	$Вт/(м^2 \cdot К^4)$	$5.67 \cdot 10^{-8}$	[6]
Параметри граничних умов статичної задачі			
Коефіцієнт Пуасона	-	0,2	[4]

Під час здійснення розрахунку побудовано кінцево-елементні схеми залізобетонного сходового маршу, які зображені на рис. 5.

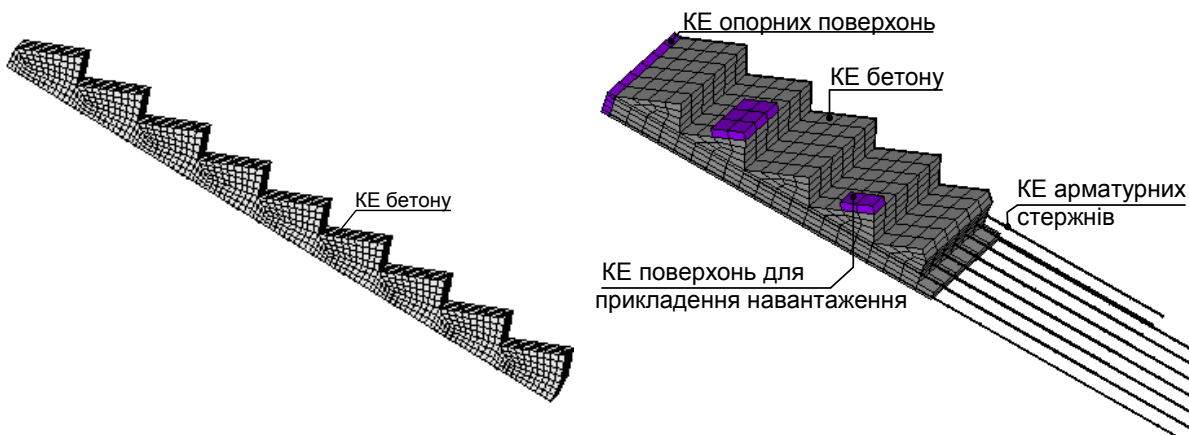


Рисунок 5 – Кінцево-елементні схеми: до теплотехнічної задачі (а); до статичної задачі (б)

Під час будівництва кінцево-елементних схем залізобетонного сходового маршу було прийнято, що сітка кінцевих елементів для розв'язання

теплотехнічної задачі має бути густішою. Сітка для задачі міцності має бути більш розрідженою. Для прикладання температурних показників у вузлові точки кінцево-елементної схеми структурної задачі була застосована лінійна інтерполяція.

Для зменшення обсягу розрахунків розглянуто симетричну половину плити під час розв'язування задачі міцності. Робота досліджуваних фрагментів у складі

всього залізобетонного сходового маршу враховується під час накладання граничних умов симетрії на бокову площину симетрії у задачі міцності. Такі умови встановлюються через прикладання відповідних односторонніх механічних в'язів.

Згідно із розв'язком теплотехнічної задачі обчислені температурні показники у залізобетонному сходовому марші, які надані як температурні криві на рис. 6.

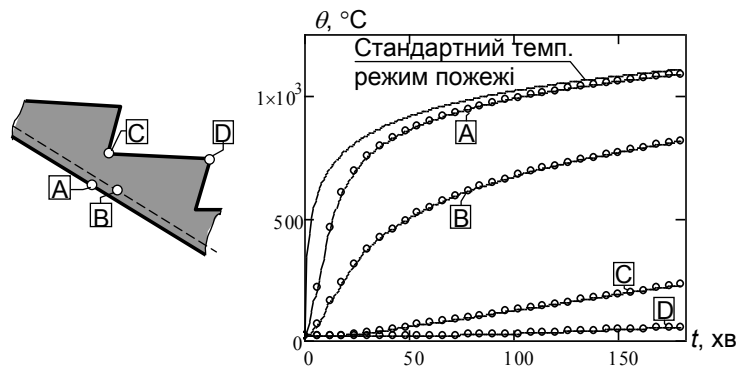


Рисунок 6 – Температурні показники нагріву у різних точках перерізу залізобетонного сходового маршу під впливом стандартного температурного режиму пожежі залежно від часу

За результатом розв'язку задачі міцності побудовано криві максимального прогину залізобетонного сходового маршу залежності від часу теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі. Побудовані криві максимального прогину наведені на рис. 7.

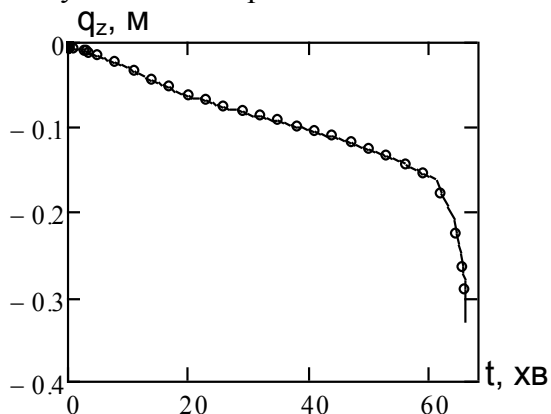


Рисунок 7 – Графік максимального прогину сталезалізобетонної плити (а) та його швидкості наростання (б) залежно від часу випробування

Перша ділянка кривої відповідає початковому навантаженню залізобетонного сходового маршу. Це ділянка із вертикальним стрибком на

початку графіка. Наступна ділянка до 60 хв теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі має помірне збільшення прогину, коли нагрів не супроводжується істотними деформаціями. Після 60 хв теплового впливу прогин інтенсивно наростає і спостерігається швидка деструкція залізобетонного сходового маршу.

Отриманий графік дає змогу зафіксувати настання граничного стану втрати несучої здатності за поточним значенням прогину у разі його порівняння із гранично допустимими, що обчислюється за формулою:

$$D = \frac{L^2}{400 \cdot b} = 164 \text{ мм.} \quad (1)$$

де  $L$  – довжина прольоту сходового маршу, мм, а  $b$  – висота суцільної частини маршу, мм.

Використовуючи такий підхід і варіюючи навантаження отримано набір кривих, були порівняні із критичним значенням прогину. Результати наведені на рис. 8.

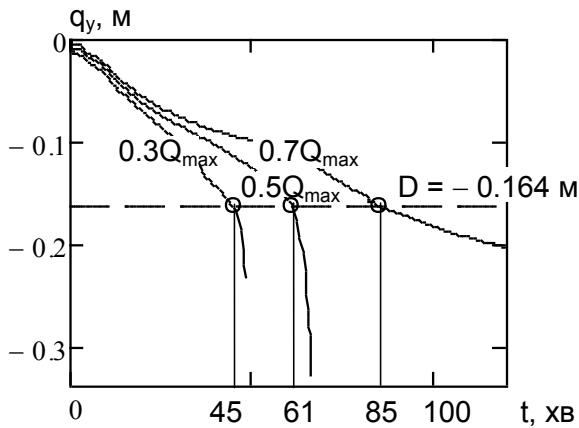


Рисунок 8 – Графіки максимального прогину залізобетонного сходового маршу залежно від часу впливу стандартного температурного режиму пожежі для різних умов навантаження

За отриманими результатами обчислень щодо оцінки вогнестійкості залізобетонного сходового маршу було побудовано криву залежності його межі вогнестійкості від рівня навантаження, що наведена на рис. 9.

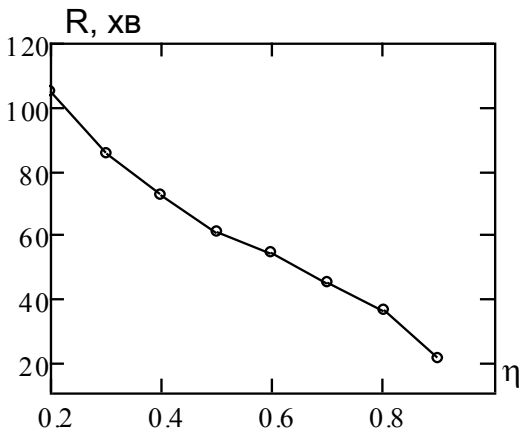


Рисунок 9 – Залежність межі вогнестійкості залізобетонного сходового маршу від рівня його механічного навантаження

**Висновки та напрями подальших досліджень.** З огляду на результати досліджень можна сформулювати такі висновки:

1. Обґрунтовано математичні моделі для обчислення температурних показників та параметрів напружено-деформованого стану для залізобетонного сходового маршу в умовах

теплого впливу стандартного температурного режиму пожежі.

2. Визначено межі вогнестійкості залізобетонного сходового маршу за несучою здатністю за різних рівнів механічного навантаження протягом часу впливу стандартного температурного режиму пожежі в інтервалі від 0 до 120 хв.

3. Найбільша межа вогнестійкості за несучою здатністю для залізобетонного сходового маршу із рівнем механічного навантаження  $0,2Q_{max}$  склала 105 хв, а найменша – 21 хв для рівня навантаження  $0,9Q_{max}$ .

4. Під час оцінювання межі вогнестійкості залізобетонного сходового маршу вивчено температурні розподіли у його внутрішніх шарах під час його нагрівання за стандартним температурним режимом пожежі та виявлено, що межа вогнестійкості

з настанням граничного стану втрати теплоізолювальної здатності складала 111 хв.

5. Під час вивчення напружено-деформованого стану залізобетонного сходового маршу в умовах механічного навантаження та теплового впливу пожежі обчислено його параметри, внаслідок чого виявлено, що залежність межі вогнестійкості за несучої здатності від рівня механічного навантаження є наближеною до лінійного.

6. Досліджено сценарій руйнування залізобетонного сходового маршу в умовах пожежі, що вбачає причину його руйнування під час нагрівання у руйнуванні шару бетону поблизу арматурних стрижнів та утворенні локальної зони деформації у зазначеній області.

7. Розроблені алгоритми обчислення параметрів напружено-деформованого стану залізобетонного сходового маршу можуть бути використані у комплексних чисельних дослідженнях для оцінки меж вогнестійкості таких сходових маршів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги : ДБН В.1.1-7:2016 [Чинний з 01.06.2017]. Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2017. 35 с.
2. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги. Пожежна безпека (ISO 834 : 1975) : ДСТУ Б В.1.1-4-98\*. [Чинний від 28.10.1998]. К. : Укрархбудінформ, 2005. 20 с.
3. Actions on structures – Part 1-2 : General actions – Actions on structures exposed to fire Part 1-2 : General rules – Structural fire design EN 1991-1-2 : 2002 Eurocode 1. Brussels. 2002.
4. Design of concrete structures Part 1-2 : General rules – Structural fire design EN 1992-1-2 : 2005 Eurocode 2. Brussels. 2004.
5. Long T. Phan, Therese P. McAllister, John L. Gross, Morgan J. Hurley Best Practice Guidelines for Structural Fire Resistance Design of Concrete and Steel Buildings. NIST Technical Note 1681. 2010. 217 p.
6. Поздєєв С. В., Левченко А. Д. Розробка уточненого розрахункового методу для визначення межі вогнестійкості несучих залізобетонних конструкцій. *Науковий вісник національного технічного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва*. 2011. № 697. С. 264–269.
7. Taras Shnal, Serhii Pozdieiev, Oleksandr Nuianzin, Stanislav Sidnei Improvement of the Assessment Method for Fire Resistance of Steel Structures in the Temperature Regime of Fire under Realistic Conditions. *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 1006. pp. 107–116.

## REFERENCES

1. *Pozhezhna bezpeka ob'ektiv budivnytstva. Zahalni vymohy* [Fire safety of construction sites. general requirements]. (2017). DBN V.1.1-7:2016 from 1<sup>st</sup> June 2017. Kyiv: DP «UkrNDNTs» [in Ukrainian].
2. *Budivelni konstruktsii. Metody vyprobuvan na vohnestiiikist. Zahalni vymohy. Pozhezhna bezpeka* [Building structures. Fire resistance test methods. General requirements. Fire Security] (ISO 834: 1975). (2005). DSTU B V.1.1-4-98\* from 28 October 1998. Kyiv: Ukrarkhbuildinform [in Ukrainian].
3. *Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire Part 1-2: General rules – Structural fire design EN 1991-1-2: 2002 Eurocode 1*. Brussels. 2002 [in English].
4. *Design of concrete structures Part 1-2: General rules – Structural fire design EN 1992-1-2:2005 Eurocode 2*. Brussels. 2004 [in English].
5. Long T. Phan, Therese P. McAllister, John L. Gross, Morgan J. Hurley (2010). *Best Practice Guidelines for Structural Fire Resistance Design of Concrete and Steel Buildings*. NIST Technical Note 1681, 217. [in English].
6. Pozdieiev, S. V., Levchenko, A .D. (2011). *Rozrobka utochnenoho rozrakhunkovoho metodu dlia vyznachennia mezhi vohnestiiikosti nesuchykh zalizobetonnykh konstruktsii* [Development of a refined calculation method for determining the limit of fire resistance of load-bearing reinforced concrete structures]. *Naukovyi visnyk natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Lvivska politekhnika»*. Teoriiia i praktyka budivnytstva, 697, 264–269. [in Ukrainian].
7. Taras Shnal, Serhii Pozdieiev, Oleksandr Nuianzin, Stanislav Sidnei (2020). *Improvement of the Assessment Method for Fire Resistance of Steel Structures in the Temperature Regime of Fire under Realistic Conditions*. *Materials Science Forum*, 1006, 107–116. [in Ukrainian].

## RESEARCH OF THE BEHAVIOR OF A REINFORCED CONCRETE STAIRCASE IN THE CONDITIONS OF THE THERMAL INFLUENCE OF FIRE

*I. Nesen*

*Cherkasy Institute of Fire Safety named after Heroes of Chornobyl of the National University of Civil Defense of Ukraine, Ukraine*

---

### KEYWORDS: ANNOTATION

reinforced  
concrete  
staircase, fire  
resistance,  
bearing capacity,  
finite element  
method

The article analyzes mathematical models describing thermal conductivity and the stress-strain state in reinforced concrete marches under the influence of the standard fire temperature mode. In order to conduct a study of the behavior of reinforced concrete stairwells under fire conditions, the main provisions and assumptions were formulated for calculating the parameters of heat propagation and the stress-strain state that occur in reinforced concrete stairwells under such conditions. On the basis of the formulated provisions and assumptions, appropriate mathematical models based on the application of the finite element method in a non-linear formulation were substantiated, and a numerical experiment was conducted based on them to identify the features of temperature distribution, deformation and destruction of a reinforced concrete staircase under the influence of a standard fire temperature regime. According to the obtained data, the regularities of the dependence of the fire resistance limit of a reinforced concrete staircase on its structural parameters were analyzed. The results of the research made it possible to formulate the following conclusions. At the same time, the limits of the fire resistance of a reinforced concrete stairwell are determined according to the load-bearing capacity at different levels of mechanical load during the exposure time of the standard fire temperature regime in the interval from 0 to 120 minutes. The highest limit of fire resistance in terms of bearing capacity for a reinforced concrete staircase with a mechanical load level of  $0.2Q_{\max}$  was 105 min, and the smallest was 21 min for a load level of  $0.9Q_{\max}$ . When studying the stressed-deformed state of a reinforced concrete staircase under the conditions of mechanical load and the thermal effect of fire, its parameters were calculated, as a result of which it was found that the dependence of the fire resistance limit for bearing capacity on the level of mechanical load is close to linear. The scenario of the destruction of a reinforced concrete staircase under fire conditions was studied, which sees the cause of its destruction during heating in the destruction of a layer of concrete in the area near the reinforcing bars and the formation of a local deformation zone in this area. The developed algorithms for calculating the parameters of the stress-strain state of a reinforced concrete staircase can be used in complex numerical studies to assess the fire resistance limits of such staircases.

# Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека

науковий журнал  
ISSN 2518-1777

Підписано до друку 30.11.2022  
Формат 60x90/8  
Обл. вид. арк. –  
Друк цифровий. Замовлення №\_\_\_\_  
Віддруковано згідно з наданим оригінал-макетом  
ТОВ «Про формат»  
Україна, 04080, м. Київ, вул. Кирилівська, 86  
Реєстраційне свідоцтво ДК № 5942 від 11 січня 2018 р.  
Тир. 50 прим.