



# НАУКОВИЙ ВІСНИК: Цивільний захист та пожежна безпека

## № 1 (15), 2023

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

ISSN 2518-1777

### Редакційна колегія:

головний редактор –

голова редколегії

д-р техн. наук

заступник

головного редактора

канд. техн. наук

відповідальний секретар

канд. техн. наук

**Поздєєв С. В.**

**Коваленко В. В.**

**Огурцов С. Ю.**

д-р техн. наук

д-р техн. наук

д-р техн. наук

д-р техн. наук

д-р техн. наук

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

канд. техн. наук

канд. техн. наук

канд. хім. наук

PhDEng.

PhDEng.

**Тютюник В. В.**

**Цапко Ю. В.**

**Ніжник В. В.**

**Єременко С. А.**

**Жартовський С. В.**

**Пруський А. В.**

**Чумаченко С. М.**

**Яковчук Р. С.**

**Лавренюк О. І.**

**Лоїк В. Б.**

**Кропивницький В. С.**

**Новак С. В.**

**Пазен О. Ю.**

**Нуязін О. М.**

**Паснак І. В.**

**Сізіков О. О.**

**Ліхньовський Р. В.**

**Врублевський Д.**

**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 27.06.2023 № 6

Ідентифікатор випуску DOI:

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1>

Підписано до друку 27.06.2023

Формат 60 × 84/8

Наклад 50 прим.

**ЗМІСТ**

**CONTENTS**

<b>Д. Трегубов</b> Пероксидно-кластерний механізм ініціювання самоспалахування	<b>4</b>	<b>D. Tregubov</b> Peroxide-cluster mechanism of the autoignition initiation	
<b>С. Новак, О. Добростан, М. Пустовий</b> Вплив температурного режиму пожежі на проміжок часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій	<b>18</b>	<b>S. Novak, O. Dobrostan, M. Pustovyi</b> The influence of the temperature-time curve on the time period of preservation of fire resistance of steel structures	
<b>Я. Балло</b> Вплив нахилу фасаду на процеси поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями	<b>32</b>	<b>Ya. Ballo</b> Influence of the slope of the facade on the processes of fire spread through the facades of buildings	
<b>Т. Скоробагатько, С. Єременко, А. Пруський, В. Сидоренко, І. Савельєв, В. Стрілець</b> Порівняльний аналіз діяльності газодимозахисників різних вікових груп	<b>41</b>	<b>T. Skorobahatko, S. Yeremenko, A. Pruskyi, V. Sydorenko, I. Saveliev, V. Strelets</b> Comparative analysis of the activity of gas smoke protectors different age groups	
<b>Ю. Фещук, С. Голікова, О. Жихарєв, А. Циганков</b> Обґрунтування оснащеності території відкритих розподільних установок 750/330 кВ атомних електростанцій первинними засобами пожежогасіння	<b>56</b>	<b>Yu. Feshchuk, S. Holikova, O. Zhikharev, A. Tsyhankov</b> Justification of the equipment of the 750/330 KV VRU territory of vp khaes with primary fire extinguishing equipment	
<b>В. Бенедюк, І. Стилик, О. Тимошенко, А. Онищук, Л. Маладика</b> Експериментальні дослідження щодо застосування горизонтальних зрошувачів для протипожежних водяних завіс	<b>66</b>	<b>V. Benediuk, I. Stylyk, O. Tymoshenko, A. Onyshchuk, L. Maladyka</b> Experimental research of using horizontal irrigators for fire-protected water curtains	
<b>В. Присяжнюк, В. Ніжник, В. Бенедюк, С. Жартовський</b> Параметри засобів димо- та тепловидалення, що характеризують ефективність функціонування	<b>75</b>	<b>V. Prisyazhnyuk, V. Nizhnyk, V. Benedyuk, S. Zhartovskyi</b> Determination of parameters of smoke and heat extraction equipment that characterize its efficiency of functioning	
<b>О. Бойко</b> Об'єкти підвищеної небезпеки: упровадження вдосконалених підходів до їх ідентифікації	<b>83</b>	<b>O. Boiko</b> Facilities of increased danger: implementation of advanced approaches to their identification	
<b>М. Карвацька, О. Лавренюк, Б. Михалічко</b> Сучасний стан і напрями вдосконалення водних вогнегасних речовин	<b>92</b>	<b>M. Karvatska, O. Lavreniuk, B. Mykhalichko</b> Current status and directions for the improvement of aqueous fire-extinguishing agents	

**А. Гаврись, Р. Яковчук, Ю. Стародуб, Н. Тур**

Управління ризиками виникнення надзвичайних ситуацій, пов'язаних із затопленням територій на рівні об'єднаних територіальних громад

101

**A. Havrys, R. Yakovchuk, Y. Starodub N. Tur**

Risk management of emergency situations related to the flooding of territories at the level of united territorial communities

**І. Несен**

Аналіз результатів вимірювань прогину зразків залізобетонних сходових маршів під час вогневих випробувань

110

**I. Nesen**

Fire tests results of deflection measurements of reinforced concrete staircase samples analysis

**П. Ілляченко, В. Ніжник, О. Нікулін**

Методика експериментальних досліджень обґрунтування параметрів системи для зниження температури трансформаторного масла нижче температури спалаху в маслоприймачі

116

**P. Illiuchenko, V. Nizhnyk, O. Nikulin**

Methodology of experimental studies for the justification of system parameters for reducing the temperature of the transformer oil below the flash temperature in the oil receiver

**А. Кодрик, А. Борисов, О. Тітенко, П. Ілляченко**

Особливості гасіння пожеж на об'єктах і спорудах із наявністю альтернативних джерел енергії

128

**A. Kodryk, A. Borysov, O. Titenko, P. Illiuchenko**

Features of fire extinguishing at objects and buildings using alternative energy sources

**О. Зобенко**

Модель протипожежного захисту електричних мереж у місцях контактних з'єднань

141

**O. Zobenko**

Model of fire protection of electrical networks at the places of contact connections

**С. Поздєєв, В. Ніжник, В. Некора, В. Михайлов, Ю. Луценко**

Особливості та перспективи ефективного функціонування захисних споруд цивільного захисту в умовах бойових дій

149

**S. Pozdieiev, V. Nizhnyk, V. Nekora, V. Mykhailov, Y. Lutsenko**

Peculiarities and prospects of effective functioning of protective structures of civil protection in conditions of hostilities

УДК 614.833.4

## ПЕРОКСИДНО-КЛАСТЕРНИЙ МЕХАНІЗМ ІНІЦІЮВАННЯ САМОСПАЛАХУВАННЯ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1.4-17>

Трегубов Д. Г., ORCID iD 0000-0003-1821-822X

E-mail: cxxttregubov1970@nuczu.edu.ua

Національний університет цивільного захисту України, Україна

### ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції:

06.12.2022

Пройшла рецензування:

20.02.2023

### КЛЮЧОВІ СЛОВА:

самоспалахування, пероксидна теорія, окиснення, пероксидний кластер, еквівалентна довжина, температура самоспалахування.

### АНОТАЦІЯ

Розглянуто вплив пероксидної природи ініціювання самоспалахування на стадійність цього процесу та необхідні зміни у методиці розрахункового прогнозування температури самоспалахування. Дослідження побудовано на припущенні, що першим елементарним актом, який призводить до самоспалахування, є утворення надмолекулярної структури як кластера пероксидного типу. Метою роботи є проведення моделювання найменшої надмолекулярної пероксидної будови вуглеводнів, яка виникає на першому етапі самоспалахування, для уточнення пероксидного механізму розвитку цього виду виникнення горіння та підвищення збіжності розрахункового прогнозування температури самоспалахування. Як базовий гомологічний ряд для моделювання таких структур обрано n-алкани. Встановлено нелінійність температур самоспалахування у зазначеному гомологічному ряду з елементами коливальності, що є ознакою існування надмолекулярних структур із неоднаковим принципом організації для різних сполук, аналогічно властивостям речовин у конденсованому стані. Для першого моменту ініціювання процесів самоспалахування визначено механізм формування взаємозв'язку між нелінійністю зміни температури самоспалахування та будовою найменших можливих кластерів пероксидного типу: формування алкілпероксидного кластера димерної будови, а для метану – додатково гекса-, для етану – тримерної будови. Розраховано усереднені еквівалентні довжини цих структур для суміші лінійних та циклічних алкілпероксидів, що модулює нелінійність зміни температури самоспалахування. Розроблено аналітичну залежність апроксимаційного характеру для опису температури самоспалахування, яка працює з коефіцієнтом кореляції  $R=0,977$  та середнім відхиленням  $5,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Новизною роботи є передбачений кластерний механізм ініціювання самоспалахування та відповідні варіанти можливих надмолекулярних структур пероксидного типу, що дало змогу розробити нову аналітичну залежність для прогнозування температури самоспалахування на підставі значень еквівалентних довжин цих структур та стехіометричного коефіцієнта реакції горіння речовини.

**Постановка проблеми.** Сучасне людство використовує з різною технологічною метою багато речовин та матеріалів, значна кількість з яких певною мірою пожежо- або вибухонебезпечні. Ступінь цієї небезпеки визначають як експериментальним, так і розрахунковим шляхом. Стосовно розрахункових методик

необхідно зауважити, що для багатьох речовин вони працюють з низькою кореляцією. Найбільші труднощі у прогнозуванні параметрів пожежної небезпеки спостерігаються для речовин, які за стандартних умов залишаються у твердому стані. Це пов'язано з тим, що для таких речовин значний внесок у їх



властивості роблять міжмолекулярні зв'язки, а більшість розрахункових методик спирається на енергетичні та структурні особливості окремої молекули. Водночас навіть щодо рідин та газів можна стверджувати про існування умов, за яких вони перебувають у твердому стані, коли також виникає значний вплив на властивості міжмолекулярних зв'язків. Цей внесок певним чином зберігається й для рідкого та газоподібного станів, але на сьогодні немає методик оцінки та способів розрахункового врахування у параметрах пожежної небезпеки речовини.

Так, нелінійність залежності у гомологічному ряду внаслідок накладання декількох факторів впливу має такий параметр пожежної небезпеки горючих повітряних сумішей, як температура самоспалахування ( $t_{cc}$ ). Нині немає цільної методики прогнозування цього параметра для органічних речовин різних гомологічних класів, що свідчить про відсутність чіткого фізико-хімічного розуміння відповідних процесів та базису для здійснення практичних розрахунків. Крім того, контакт горючих повітряних сумішей з нагрітими поверхнями є поширеною причиною виникнення пожеж. Отже, вдосконалення методики розрахунку  $t_{cc}$  із урахуванням механізмів виникнення горіння є актуальною задачею.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Найпростішим шляхом встановлення значень  $t_{cc}$  є визначення цього параметра у лабораторних умовах за стандартних випробувань [1]. Але дані, отримані за таких досліджень, не завжди моделюють небезпеку за контакту з реальними нагрітими поверхнями, тому й проводять повномасштабні випробування на такий контакт для значних пароповітряних хмар у стендових умовах [2].

Крім того, важливо також знати й причини різної поведінки речовин за певних умов, тобто актуальною є необхідність використання відповідних розрахункових методик, що надасть можливість прогнозувати їх пожежну небезпеку. Здебільшого у методиках

розрахунку параметрів пожежної небезпеки, у тому числі й  $t_{cc}$ , використовують формули, які не мають ні фізичного, ні хімічного сенсу та є апроксимаційними. Також є розрахункові методики, які ґрунтуються на теоріях окиснення, як стадії розвитку процесів горіння, властивостях речовини. Але вони не точні та складні для практичного використання, оскільки в них не враховуються усі параметри та їх співвідношення внаслідок неповного бачення фізико-хімічних основ певного процесу в комплексі.

Існує теоретичний підхід до таких розрахунків, заснований на можливостях математичного апарату, який описує тепловий вибух та межі ланцюгового самоспалахування [1]. У тепловій теорії розглядається процес горіння як баланс між виділенням тепла у зоні реакції та його тепловтратами у навколишній простір, у ланцюговій теорії – як баланс процесів виникнення та загибелі активних радикальних центрів за розвитку полуменевого горіння. У теорії теплового вибуху враховується дослідний факт, що самоспалахування виникає у точці, від якої горіння поширюється на всю суміш, а також неоднорідність температурного поля у системі. Така неоднорідність з максимумом температури у центрі буде існувати навіть у нагрітій системі, де не протікає екзотермічна реакція. У розширеній версії цієї теорії розв'язується задача нестационарності процесу, що пов'язано з витрачанням реагентів за період індукції під час повільних процесів окиснення (для малих  $t_{cc}$  найдовший період індукції досягає десятків секунд). Проте вказані теорії не повно описують причину ініціювання горіння в умовний «нульовий» момент. З огляду на це, а також внаслідок складності задіяного математичного апарату у практичних розрахунках використовують фрагментарні властивості речовини, на підставі яких створюють апроксимаційні залежності.

Значна кількість поширених підходів для прогнозування найменшої температури

суміші, за якої самоприскорюється реакція окиснення, заснована на визначенні середньої довжини каркасного ланцюга  $l_{сер}$  або еквівалентної довжини  $l_{екв}$  молекули із урахуванням внесків функціональних груп [1]. За значенням цієї довжини користуються таблицями або апроксимаційними формулами, побудованими на систематизації зазначеної залежності для алканів. Точність прогнозування  $t_{cc}$  залежить від точності визначення довжини молекули. Використовують також прямий перерахунок  $t_{cc}$  алканів на сполуки інших гомологічних класів з аналогічним алкіл-радикалом, проте така апроксимація призводить до значних похибок.

Науковці здійснюють спроби систематизувати внесок різних функціональних груп у формування схильності речовини до самоспалахування [3], але вони призводять лише до часткових успіхів та потребують залучання індивідуальних коефіцієнтів. Для широкої номенклатури речовин застосовують загальний підхід Марреро-Гані, який придатний і для прогнозування  $t_{cc}$  [4]. Цей метод передбачає врахування інкрементів функціональних груп з послідовними рівнями уточнення: 1) сполуки нормальної будови; 2) сполуки ізомерної будови; 3) сполуки гетеро- та ациклічної будови. Також застосовують розрахунки на підставі полінома, який враховує не лише кількість атомів карбону та функціональних груп, а й гідрогену з досягненням задовільної збіжності розрахунку [5]. Але усі означені методики не враховують механізмів ініціювання горіння, які можуть спостерігатися під час самоспалахування. Незалежна перевірка цих та інших методик розрахунку на прикладі масиву з 875 органічних сполук показала  $R^2$  не більше ніж 0,83 із середнім відхиленням 37,8 °C [6].

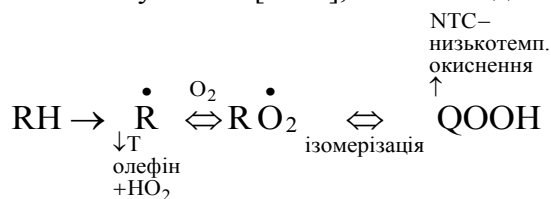
Раніше ми вдосконалили стандартну методику прогнозування  $t_{cc}$ , у тому числі для сумішей різних горючих речовин [1; 7]. Встановлено нові залежності для розрахунку  $l_{сер}$  та  $t_{cc}$  на підставі врахування мезомерного та індукційного ефектів

перерозподілу електронної щільності за довжиною молекули та внаслідок наявності певних функціональних груп. Отримано підвищення коефіцієнтів кореляції з довідковими даними для різних алкан-похідних. Проте цей підхід залишається апроксимаційним та потребує індивідуальних коефіцієнтів для різних гомологічних класів. У роботі також виявлено наявність від'ємного або позитивного відхилення  $t_{cc}$  для сумішей горючих рідин щодо  $t_{cc}$  компонентів. Таке явище спостерігається для характерних температур, наприклад для температури плавлення ( $t_{пл}$ ) азеотропних сумішей, які за допомогою міжмолекулярних зв'язків утворюють кластер нестандартно більшого або меншого розміру. Цей факт передбачає утворення і у полум'ї надмолекулярних структур за принципом конденсованого стану речовини.

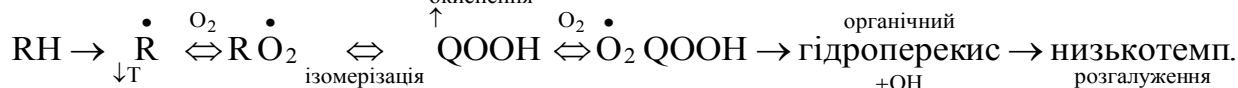
Для тестування особливостей надмолекулярної будови запропоновано враховувати особливості зміни у гомологічних рядах температур кипіння ( $t_{кип}$ ),  $t_{пл}$ , а також  $t_{cc}$  [8]; встановлено наявність кореляції  $t_{кип}$  і  $t_{пл}$  з  $t_{cc}$  в межах  $R=0,82-0,9$ . На підставі аналізу ряду  $t_{пл}$  в гомологічному ряду алканів виявлено осциляційність значень та деякі інші аномалії, що пояснено чергуванням принципу кластеризації для «парних» та «непарних» молекул. Залежність для  $t_{cc}$  теж має відхилення від простої логічної послідовності. Викладене вище дає підстави поширити досліджені механізми кластеризації твердих речовин і на процеси у полум'ї.

Крім теплової та ланцюгової теорій горіння, існує пероксидна теорія окиснення, яка описує й проміжний етап у процесах горіння [1]. Спектральний аналіз полуменевого горіння фіксує відповідні сполуки у полум'ї. Але, ймовірно, більш інтенсивний пік буде не стільки у сполуки, що утворюється у більшій кількості, скільки у сполуки, яка існує більш тривалий період. Зазначають, що пероксиди утворюються як на початкових стадіях горіння, в тому числі й

самоспалахування [9–10], так і під час



поширення полум'я:



Для алканів констатовано існування середньої області температур нагрітої стінки з негативним температурним коефіцієнтом (NTC) для  $t_{cc}$ , коли збільшення температури стінки збільшує час індукції перед виникненням горіння, що формує три температурні області з різними механізмами ініціювання горіння. Водночас без пояснень вказують на можливість ініціювання більшої швидкості детонації низькотемпературним окисненням. Також винайдено, що у детонаційній хвилі є поперечні ударні хвилі та зони недопалу як коміркові структури навіть для сумішей з малим стехіометричним коефіцієнтом  $\beta$ . Можна прийняти, що початком більшості реакцій є утворення кластера базової речовини з реагентом, надалі більш слабкий зв'язок руйнується й атом вихідної речовини остаточно заміщується.

Оскільки найменший кластер є основою властивостей речовини [8], можна розглянути його роль у процесах окиснення. За ланцюговою теорією процес окиснення вуглеводнів у полум'ї відбувається через стадію утворення гідропероксидів [1], які швидко розкладаються за зв'язком O–O:  $\text{ROOH} \rightarrow \text{RO}\cdot + \text{OH}\cdot$  з можливим утворенням альдегідів як проміжних сполук. Для метану можлива лише лінійна схема з більш імовірним утворенням не гідро-ROOH, а алкілпероксиду  $\text{R}_1\text{OOR}_2$ , для пропану можливо ще й приєднання паралельної до молекули пероксидної групи. Можна розглядати модель утворення алкілпероксиду з димеру алкану.

На сьогодні пероксидна теорія не пояснює окиснення елементоорганічних та неорганічних сполук, самоприскорення хімічної реакції у разі самоспалахування, існування періоду індукції, а також вплив каталізаторів або інгібіторів. Усі ці явища

досить добре пояснює ланцюгова теорія окиснення вуглеводнів, яка згадує й етап утворення пероксидів [1]. Вільно-радикальні реакції легше ініціюються, якщо суміш містить сполуки зі слабкими зв'язками: N=N, N–C, O–O, N–O. Однак можна говорити про те, що енергія цих зв'язків наближається до енергії міжмолекулярної взаємодії, що може сприяти утворенню кластерів з їх подальшим розкладанням у місці слабких зв'язків. Енергія дисоціації пероксидного зв'язку –O–O– становить у середньому  $200 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$ .

Таким чином, нерозв'язаною частиною проблеми розрахункового прогнозування  $t_{cc}$  є врахування фізико-хімічних механізмів для початкових стадій у горючій повітряній суміші під час ініціювання самоспалахування, що пов'язані з утворенням пероксидних надмолекулярних структур. Моделювання цих структур дасть змогу поглибити знання про процеси, що супроводжують самоспалахування, та уточнити методіку розрахунку  $l_{cep}$  та  $t_{cc}$ .

### Формулювання цілей

**дослідження.** Метою цієї роботи є моделювання найменшої надмолекулярної пероксидної будови вуглеводнів, яка виникає на першому етапі самоспалахування, для уточнення пероксидного механізму розвитку зазначеного виду виникнення горіння та підвищення збіжності розрахункового прогнозування температури самоспалахування.

Для досягнення поставленої мети передбачено розв'язання таких завдань:

- встановити взаємозв'язок між нелінійністю зміни температури самоспалахування у рядах алканів з будовою найменших можливих кластерів пероксидного типу;

- розробити аналітичну залежність для опису температури самоспалахування на підставі отриманих відомостей щодо надмолекулярної будови алканів під час виникнення горіння.

**Методи дослідження.** У методиці теоретичного дослідження передбачено послідовний аналіз певних ефектів, що можуть впливати на формування різних характерних температур речовини. Розглянуто можливості врахування процесів реорганізації молекулярної будови речовини у надмолекулярну на прикладі гомологічного ряду алканів, щодо якого усі інші класи органічних сполук є похідними. Для цього проведено аналітичне співвіднесення характерних температур вуглеводнів для виявлення наявності або відсутності періодичності надмолекулярної будови речовини у різних агрегатних станах та під час виникнення горіння. Розглянуто можливість прогнозування особливостей зміни характерних температур у гомологічному ряду за значенням еквівалентної довжини найменшої надмолекулярної структури як димеру або кластерів з більшим координаційним числом. Вказана методика стала розвитком стандартної для визначення  $t_{cc}$  та базується на встановленні значення середньої довжини одиначної молекули  $l_{сер}$  [1].

Уточнення можливих причин виникнення періодичності значень еквівалентних довжин кластерів  $n_{секв}$  та  $t_{cc}$  проведено із врахуванням впливу внутрішньомолекулярних електронних ефектів, таких як виникнення валентних кутів взаємодії, індукційного та «пентанового» ефектів тощо. Їх наявність визначає місце кластеризації молекул за довжиною карбонового ланцюга. Застосування такої методики мало на меті перевірити гіпотезу про визначальну роль в ініціюванні процесу горіння проміжних надмолекулярних утворень як пероксидних комплексів та запропонувати можливі варіанти їх структури. Для розрахунку довжини надмолекулярних утворень взято суттєву відмінність від стандартної методики для  $l_{сер}$  [1]: довжина кластера

здебільшого визначається за найбільш довгим ланцюгом між кінцевими групами крайніх мономерів кластера, а наявність та довжина бокових ланцюгів за цих умов не враховується, як і за раніше розробленою методикою для прогнозування  $t_{пл}$  вуглеводнів [8]. У разі циклічного кластера враховується найбільша довжина між найбільш віддаленими ланками такого циклу. За потреби врахування суміші кластерів різної будови враховується їх середня довжина. У довжині пероксидного кластера пероксидна група, яка входить у склад визначеного найбільш довгого ланцюга, враховується як «1».

Передбачається отримати одну аналітичну залежність замість двох за стандартною методикою [1], яка опише взаємозв'язок між довжиною кластера та  $t_{cc}$  н-алканів з доброю кореляцією. На формування  $t_{cc}$ , крім  $n_{секв}$ , впливає потреба у кисні для горіння, що показує стехіометричний коефіцієнт реакції горіння  $\beta$  для мономолекулярного стану. Цей параметр також надає індикацію дифузійних ускладнень в ідеальній горючій суміші. Обидва ці параметри,  $n_{секв}$  та  $\beta$ , мають обернено пропорційний взаємозв'язок з  $t_{cc}$ , що закладено у побудову апроксимаційної залежності. Валідність запропонованих апроксимаційних рішень встановлювалась за позитивною динамікою середнього абсолютного відхилення та коефіцієнта кореляції відповідно до функціональних можливостей програми Excel. Похибки розробленої методики розрахунку  $t_{cc}$ , крім самої апроксимаційної залежності, можуть визначатися помилками встановлення довжин кластерів та їх співвідношення у суміші.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для розкриття поняття «виникнення горіння» потрібно розглядати усі складові цього процесу: утворення горючої повітряної хмари шляхом випаровування, процеси розкладання, дифузії; розігрів цієї системи до певної критичної температури із врахуванням передавання та поглинання тепла; достатність енергії джерела запалювання

для цього; процес поширення горіння як повторюване виникнення горіння. Якщо розвивати пероксидну теорію окиснення для процесів горіння, яка передбачає утворення на початковому етапі нестійких пероксидних сполук, то можна запропонувати існування швидкоплинної стадії виникнення надмолекулярних структур пероксидного типу.

Властивості речовини у твердому стані певним чином співвідносяться з процесами полуменевого горіння тієї ж самої речовини у газоподібному стані, що є індикатором впливу міжмолекулярних зв'язків. Зазначено що,  $t_{пл}$  або  $t_{кип}$  формуються наявністю найменшого кластера [8]. За умов самоспалахування кластери різної будови у процесах окиснення будуть більш рівноправними, тому визначальними стають усереднені властивості суміші. Так, за  $t_{пл}$  середня довжина кластера визначає його рухомість під час утворення рідкого стану, а за  $t_{cc}$  – здатність до утворення різних геометричних надмолекулярних пероксидних структур з різною компактністю, що встановлює різний ступінь дифузійних ускладнень під час хімічної реакції. Якщо проаналізувати співвідношення характерних температур алканів ( $t_{кип}$ ,  $t_{пл}$ ,  $t_{cc}$  та температури спалаху  $t_{сп}$  [11]), то можна побачити, що найбільш близький характер до  $t_{cc}$  має зміна  $t_{пл}$ , але із дзеркальним виглядом залежності, рис. 1.

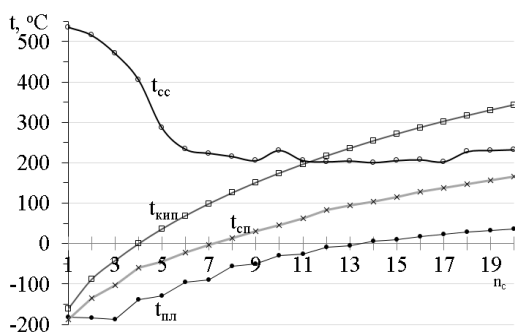


Рисунок 1 – Характерні температури н-алканів  
Джерело: узагальнено автором

Відмінностями  $t_{пл}$  від  $t_{cc}$  є негативний температурний ефект для  $t_{пл}$  метану й етану, а також стабілізація  $t_{cc}$  з тенденцією до негативного температурного ефекту для алканів, починаючи з ундекану. Тобто на залежності  $t_{cc}$  від довжини карбонового

ланцюга алканів  $n_c$  є три ділянки, тому стандартна апроксимація використовує дві формули (перша ділянка маленька). Водночас помітно, що починаючи з ундекану  $t_{кип}$  досягає  $t_{cc}$  і надалі стає більшою. Це означає, що температури поверхні рідини достатньо для її запалювання, але над поверхнею за таких умов концентрація пари досягає 100%; змішування ж з повітрям до вибухонебезпечних концентрацій охолоджує суміш, тому її температура виявляється вже недостатньою для ініціювання самоспалахування. Але означений ефект буде подовжувати час індукції та збільшувати втрату реагентів. Стабілізацію значень  $t_{cc}$  у гомологічному ряду формально пов'язують зі збільшенням молярної маси [1], але ця залежність має бути лінійною. Функцією молярної маси можна вважати стехіометричний коефіцієнт реакції горіння, який вже має нелінійність; так, на відріжку від метану до декану він зменшується у дев'ять разів, а від декану до ейкозану – в 1,9 рази. Спроби апроксимувати  $t_{cc}$  на підставі значень характерних температур та стехіометричного коефіцієнта дали  $R = 0,83-0,92$ .

Осциляційність  $t_{пл}$  свідчить про утворення найменшої надмолекулярної будови н-алканів переважно як димерів з періодичною зміною структури для «парних» та «непарних» молекул за кількістю атомів карбону та аномалією для метану та етану. Для  $t_{сп}$  та  $t_{кип}$  такої аномалії вже немає, але для  $t_{сп}$  залишається незначна пульсація значень, а для  $t_{кип}$  графік вже повністю плавний. Означене свідчить, що за  $t_{сп}$  ще зберігається димерна будова, а  $t_{кип}$  можна вважати температурою руйнування димерів з випаровуванням мономолекулярної речовини (для деяких кисневмісних рідин відомо випаровування у вигляді димерів). Також, привертає увагу те, що  $t_{сп}$  метану є меншою, ніж його  $t_{пл}$ . Таке явище спостерігається для речовин з молекулами циклічної гексабудови (гексан, бензен), що підтверджує запропоновану раніше найменшу надмолекулярну

структуру метану у твердому стані у вигляді гексамеру [8].

Взаємозв'язок  $t_{ce}$  з параметрами конденсованого стану речовини можна пояснити тим, що першою стадією окиснення речовини у газоподібному стані є утворення пероксидних сполук, які здатні формувати полімероподібні структури, що відбувається за спорідненими механізмами до організації надмолекулярної будови твердих речовин. Пероксидний механізм самоспалахування розглядають як основний на прикладі окиснення алканів за незначних температур нагрітих поверхонь [9]. Крім того, під час самовільного процесу виникнення горіння скупчень вугілля після адсорбції кисню повітря відбувається його хемосорбція з утворенням пероксидних комплексів [1]. З цим процесом можна пов'язати вибухоподібні викиди метану з пласту вугілля, який нещодавно розкрито. Існує модель емісії молекул метану у нанопорах вугілля [12], але з погляду пероксидної теорії можна розглянути наявність у момент розкриття пласта більш інтенсивних процесів адсорбції та хемосорбції. Саме утворення пероксидних комплексів може перерости у миттєвий кооперативний процес, схожий на процеси у швидкому фронті полум'я, оскільки кластеризація супроводжується виділенням тепла (як під час адсорбції кисню мікропорами вугілля [1]).

Існує теорія, що у фронті полум'я через наявні тиски утворюється нанопориста квазірідина з протіканням у нанопорах ударно-іонізаційних процесів, що й активує ланцюгові реакції [12]. Але цю модель лише умовно можна застосувати для нижньої та верхньої концентраційних меж поширення полум'я (КМПП), коли фронт полум'я пересувається з нормальною швидкістю, яка для більшості речовин становить до 1 м/с, та для самоспалахування горючої повітряної суміші від гарячої стінки, оскільки підготовчі процеси до виникнення горіння відбуваються у кожній точці суміші окремо. Тоді необхідно прийняти, що під час руху у фронті

полум'я досягається тиск, достатній для можливості конденсації або горючого у плівку з подальшою пероксидною кластеризацією, або вже пероксидного кластера внаслідок більшої молярної маси, що має різні швидкості процесів. З огляду на це виникає або дефлаграційний, або детонаційний механізм поширення горіння. Плівка у фронті полум'я як цільна непроникна система може допомагати створювати тиск перед ним. Також відзначають [12], що у фронті полум'я утворюються аморфні та наноалмазні структури, що може свідчити про наявність алкілпероксидів  $R_1-C-O-O-C-R_2$ , тобто утворюється не  $2CO$ , а  $C+CO_2$ . Схожий механізм можна запропонувати для утворення сажі, а також для викиду метану після розкриття вугільного пласта, але вже з вивільненням не атому карбону, а молекули метану. Тоді й утворення алмазів у кімберлітових трубках за витискання магми через точку різкого звуження можна розглядати за пероксидним механізмом.

Для умов самоспалахування можна зазначити, що у підготовленій до запалювання суміші фронт полум'я поширюється зі швидкістю більшою, ніж може забезпечити розширення гарячих продуктів горіння або процес теплопровідності. Отже, йдеться про те, що у перший момент самоспалахування немає руху газів, а є лише швидке проростання фронту полум'я у майже запалену підготовлену суміш. Якщо тисків для утворення квазірідини не створюється, виникнення горіння через самоспалахування можна пояснити з погляду механізму утворення суцільних пероксидних структур у всьому об'ємі прогрітої горючої суміші, тоді як для швидкого фронту полум'я можна розглядати модель формування нанопористої плівки квазірідини моно- або бімолекулярної товщини. Тоді у разі виникнення самоспалахування можна стверджувати про налаштування об'ємно-сітчастої надмолекулярної структури.

Якщо пероксидна кластеризація відбувається на всій поверхні (у мікропорах вугілля або сконденсованої плівки горючого у стиснутому фронті полум'я), тобто гетерогенно як кооперативний процес, то це може відбуватися як вибухове перетворення. За самоспалахування або у холодному полум'ї пероксидна кластеризація відбувається в об'ємі. Для такого процесу можна запропонувати або гомогенне утворення пероксидних комплексів, або все ж таки гетерогенний процес їх конденсації у нанопористу полімероподібну структуру. Тоді  $t_{cc}$  – це температура ініціювання суцільного кооперативного процесу. Водночас можуть виникати первинні пероксидні структури різного типу (лінійні або циклічні). Так, ізомерний алкан з одним розгалуженням буде формувати три варіанти пероксидних структур з різною загальною довжиною. З огляду на це стандартна методика прогнозування  $t_{cc}$ , на підставі визначення середньої довжини молекули опосередковано враховує будову пероксидного кластера.

Вирішення питання про різні механізми горіння за різних концентрацій або швидкостей фронту полум'я з погляду теорії, що надається, полягає у тому – що раніше відбудеться: утворення пероксидних надмолекулярних структур чи перехід газоподібної горючої речовини у надмолекулярний стан квазірідини або квазітвердої речовини. В останньому випадку плівка цього утворення буде гетерогенно контактувати з повітрям, де, умовно, кожне п'яте місце зайнято молекулою кисню, а густина газоподібного стану ще й на три порядки менша. Незначно збагачені суміші (відносно стехіометричної концентрації) горять шляхом утворення менш вимогливих до приєднання кисню пероксидних структур, тому цей процес відбувається більш швидко. Існування КМПП з погляду пероксидної теорії окиснення можна пояснити тим, що за менших концентрацій, ніж нижня КМПП, та більших, ніж верхня КМПП, пероксидні структури не можуть

«проростати» у холодну суміш унаслідок критичної нестачі одного з компонентів, тобто безперервна пероксидна структура не може утворитись. Теж саме можна сказати про температури менші за  $t_{cc}$ , але тепер вже температури не вистачає, щоб забезпечити хоча б критичну інтенсивність утворення пероксидних структур. Особливості зміни  $t_{cc}$  у гомологічному ряду можна пояснити з погляду можливості утворення пероксидних структур. Відзначають, що холодне полум'я парафінових та інших вуглеводнів має спектр світіння збудженого формальдегіду (карбонільна група розташована наприкінці карбонового ланцюга). Для метану й етану немає альтернативи початку реакції, крім як за місцем кінцевих груп, що відрізняє їх від інших алканів. Починаючи з пропану виникає карбон внутрішнього ланцюга і можливість приєднання пероксидної групи паралельно ланцюгу з подальшим розкладанням утвореного комплексу та доокисненням більш довгого радикала вже за принципом етану. Кінцеві групи  $-CH_3$  створюють перерозподіл електронної щільності всередину ланцюга як індукційного ефекту, дія якого, як затухаючого процесу, стає непомітною на п'ятому карбоні. Тоді всередині довгого ланцюга виникає місце більш схильне до утворення пероксидного комплексу. Створюється принцип ланцюгового половинного поділу залишків-радикалів молекули. Але слід зауважити, що з певної довжини карбонового ланцюга він починає глобулізуватися, тоді надалі ефективна довжина довгих молекул для початку цього механізму пероксидної кластеризації буде залишатися постійною, що й проявляється у стабілізації значень  $t_{cc}$ .

Самоспалахування (тепловий вибух) речовини, як і вибух вибухової речовини, повинно мати у момент виникнення кооперативний процес суцільної кластеризації з утворенням проміжного стану нової форми речовини, яка надалі розкладається з ініціюванням ланцюгових процесів аж до формування продуктів горіння. Ефект ініціювання кооперативної

самоорганізації речовини можуть зумовлювати підвищення температура системи, тиск, різкий удар тощо. Для ініціювання самоспалахування потрібна певна температура суміші; у разі запалювання таким шляхом багатих та бідних сумішей необхідний додатковий нагрів. Це можна пояснити тим, що нагрів або стиснення підіймають потенційну енергію системи до рівня достатнього для «атаки» киснем «слабкого» місця саме цієї молекули та для подолання дифузійних ускладнень навіть у готовій горючій суміші. Також за умов збільшених температур значною мірою зростають внутрішньомолекулярні відстані між атомами, а за умов збільшених тисків значно зменшуються міжмолекулярні відстані.

Що ж до протікання реакції горіння, то чим більший стехіометричний коефіцієнт  $\beta$  (як для важких вуглеводнів), тим більше проявляються ці дифузійні ускладнення. Для багатих сумішей необхідна додаткова температура для подолання дифузійних ускладнень молекул кисню, для бідних сумішей – для подолання дифузійних ускладнень пероксидних кластерів у середовищі надлишкового повітря. За зазначеної температури протягом часу індукції утворюється певна найменша достатня кількість надмолекулярних структур, яка надалі одномоментно (кооперативно) реорганізується у пероксидну надмолекулярну будову, що миттєво розкладається з ініціюванням ланцюгових вільнорадикальних процесів. Так, термічне розкладання органічних пероксидів активніше відбувається у повітрі, ніж для чистих сполук, та починається за менших температур [13].

Вплив довжини молекули на  $t_{cc}$  можна пояснити з погляду достатності кисню на процес початку окиснення та подальшого тепловиділення. З одного боку, більш важкі та довгі молекули для утворення пероксидного димеру потребують менше кисню, але перетворення цього димеру в алкілпероксид супроводжується меншим

виділенням тепла, тому процес подальшого розвитку самоспалахування для більш важких та довгих молекул потребує вже більших температур для можливості ініціювання подальших етапів процесу окиснення.

Стандартна методика передбачає розрахунок середньої довжини  $l_{сер}$  ізомерної молекули спиртів або алканів за принципом комбінаторики; ми додатково розробили методику визначення еквівалентної довжини  $l_{екв}$  кетонів, альдегідів, простих та складних ефірів [1]. Вважається, що кетони та складні ефіри є у два рази коротшими, ніж довжина карбонового ланцюга  $n_c$ , що можна розглядати як кластеризацію по місцю карбонільної групи  $C=O$  з відсіканням частини молекули від еквівалентної довжини кластера. Прості ефіри та альдегіди проявляють себе як більш довгі молекули відносно кількості атомів карбону. Тобто для альдегідів також можна запропонувати кластеризацію по місцю карбонільної групи з утворенням подовженого кластера. Для вибухових сполук за аналогією можна передбачити кластеризацію по місцю нітрогрупи, а саме – по зв'язку  $N=O$ .

Щоб спрогнозувати можливу надмолекулярну будову алканів необхідно розуміти різницю у принципах організації коротких та довгих молекул алканів. Так, в алканах існує пентанова «інтерференція», яка проявляється на кожному п'ятому карбоні (конформаційний перегин молекули) [14]. Молекули довгих вуглеводнів нормальної будови мають жорсткі сегменти з 11 атомів карбону. Чим більша температура, тим більша гнучкість ланцюгів. Довгі молекули можуть загинатися на кінцях, згортатися у клубки, а іноді – у сферичні глобули. Більш короткі *n*-алкани та ізомерні алкани більш стійкі до детонації [1], що можна пояснити більшим значенням  $t_{cc}$ . Для ізомерних сполук розраховують їх  $l_{сер}$  за середнім значенням можливих довжин молекули між кінцевими групами. Якщо врахувати раніше доведене для рідкого стану існування алканів, подібних до



димерів [15], та запропонувати лінійну димерну (відносно алкану) пероксидну структуру, то сутність середньої довжини ізомерної молекули полягає у тому, що будуть утворюватися як довгі варіанти димерів, так і короткі. Тоді середня довжина кластера відбиває середньостатистичний пероксидний комплекс.

Для довгих *n*-алканів можна запропонувати два варіанти врахування стабілізації  $t_{cc}$ : а) «клубок» або «глобулу» у схемі розрахунку довжини молекули можна вважати таким самим елементом ланцюга, як один атом карбону (так само, як бензолне кільце для алкілпохідних бензену); б) у довгих молекулах на відрізьку відсутності ізомерного ефекту пероксидна група приєднується посередині, що й зменшує довжину молекули, як у разі ізомерних сполук. З огляду на це можна розробити лінійні та циклічні моделі формування певної еквівалентної довжини  $n_{Секв}$  для пероксидних надмолекулярних утворень алканів, які у вигляді суміші й формують  $t_{cc}$ . Результати такого моделювання та прогнозована  $t_{cc}$  наведені у табл. 1.

Середню еквівалентну довжину кластера  $n_{Секв}$ , яка визначає здатність алкану до самоспалахування у повітряному середовищі та значення  $t_{cc}$ , визначали як середнє між лінійною та циклічною формою кластера у співвідношенні 50/50% (для метану перед цим визначалася  $n_{Секв}$  суміші кластерів димерної та гексамерної форми або тримерної для етану). У розрахунку цього параметра пероксидну групу –O–O– прийнято як ланку ланцюга довжиною «1». Деякі ймовірні структури у запропонованих схемах моделювання не було враховано, наприклад можливість додаткової кластеризації довгих алканів середніми частинами молекул. Також не

враховано гідропероксидні структури, оскільки за механізмом кластеризації їм немає звідки виникнути, тобто у цій моделі вони є вторинними утвореннями, які вже не впливають на формування  $t_{cc}$  за цих умов.

Для розрахунку довжини лінійних пероксидних кластерів були прийняті такі схеми їх структури: 1) для алканів до гептану – за кількістю атомів карбону й проміжних пероксидних груп; 2) від октану до додекану – з «накладанням» частини довжини молекул алкану та кластеризацією не за кінцевим карбоном зі зміщенням на декілька місць, але не більше ніж половина довжини ланцюга; 3) для три-, тетра- та пентадекану – кластеризація середнім карбоном обох молекул із врахуванням більш довгого ланцюга; 4) для молекул, довших за пентадекан, враховується глобулізація (згортання у клубок) кінцевих частин молекул з наявністю незгорнутої частини (для ейкозану спрацювала модель кластеризації двох глобул безпосередньо). Для метану можна було б врахувати наявність у рівній пропорції, крім димеру та гексамеру, ще й три-, тетра- та пентамеру, але це не змінює середньої довжини, тому у розрахунку прийнято до застосування більш просту модель.

Для розрахунку довжини циклічних пероксидних кластерів було прийнято такі схеми їх структури: 1) для усіх розглянутих алканів, крім групи речовин, які зазначено у наступному пункті, – за довжиною ланцюга між найбільш віддаленими ланками циклу; 2) для сполук від пентану до нонану передбачено циклічну кластеризацію не кінцевим карбоном, тому у довжині кластера враховували кількість атомів карбону між кінцевими групами поза циклом та одну з пероксидних груп.

Таблиця 1. Параметри алканів та прогнозовані довжини кластерів з відповідним значенням  $t_{cc}$

Алкан та його параметри				Еквівалентна довжина кластера $n_{секв}$			$t_{cc}$ , °C, за розрахунком (1)
Назва	$l_{сер}$ (ст. мет.)	$t_{cc}$ , °C	$\beta$	Лінійний алкілпероксид	Циклічний алкілпероксид	Суміш пероксидів	
Метан	1	537	2	(3+11)/2=7	(3+7)/2=5	6	535,3
Етан	2	515	3,5	(5+8)/2=6,5	(4+6)/2=5	5,75	506,1
Пропан	3	470	5	(2*3+1)=7	(3+1)=4	5,5	495,3
Бутан	4	405	6,5	(2*4+1)=9	(4+1)=5	7	394,7
Пентан	5	286	8	(2*5+1)=11	(2*5+1-1)=10	10,5	288,5
Гексан	6	233	9,5	(2*6+1)=13	(2*6+1-1)=12	12,5	253,0
Гептан	7	223	11	(2*7+1)=15	(2*7+1-1)=14	14,5	228,1
Октан	8	215	12,5	(2*8+1-1)=16	(2*8+1-1)=16	16	213,1
Нонан	9	205	14	(2*9+1-1)=18	(2*9+1-3)=16	17	204,1
Декан	10	210	15,5	(2*10+1-1)=20	(10+1)=11	15,5	211,9
Ундекан	11	205	17	(2*11+1-3)=20	(11+1)=12	16	206,4
Додекан	12	202	18,5	(2*12+1-5)=20	(12+1)=13	16,5	201,4
Тридекан	13	204	20	(2*8+1)=17	(13+1)=14	15,5	206,3
Тетрадекан	14	200	21,5	(2*8+1)=17	(14+1)=15	16	201,5
Пентадекан	15	205	23	(2*8+1)=17	(15+1)=16	15,5	203,4
Гексадекан	16	207	24,5	(1+5+1+5+1)=13	(16+1)=17	15	205,5
Гептадекан	17	202	26	(1+5+1+5+1)=13	(17+1)=18	15,5	200,9
Октадекан	18	227	27,5	(1+2+1+2+1)=7	(18+1)=19	13	218,9
Нонадекан	19	230	29	(1+1+1+1+1)=5	(19+1)=20	12,5	222,4
Ейкозан	20	232	30,5	(1+1+1)=3	(20+1)=21	12	226,2

Автори статті на підставі значення коефіцієнта  $\beta$  для мономолекулярного стану речовини й впровадженого показника  $n_{секв}$  для первинної надмолекулярної пероксидної структури алкану розробили апроксимаційну формулу для опису зміни  $t_{cc}$  у гомологічному ряду n-алканів.

$$t_{cc} = \frac{3000}{\beta^{0,2} n_{секв}} + 100, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1)$$

де  $\beta$  – стехіометричний коефіцієнт реакції горіння, моль·моль<sup>-1</sup>;

$n_{секв}$  – еквівалентна довжина пероксидного кластера.

Розроблена формула (1) надає можливість прогнозувати  $t_{cc}$  n-алканів із коефіцієнтом кореляції  $R=0,997$  та середнім абсолютним відхиленням 5,5 °C. Найбільша похибка спостерігається для пропану, якщо для нього запропонувати аномальну відмінність від «сусідів» за гомологічним рядом – кластеризацію за місцем другого атома карбону, то довжина лінійної та циклічної форми надмолекулярних структур буде мати

значення  $(2*3+1-1)=6$ , що підвищить кореляцію. Ефективність розрахунку досягнуто внаслідок врахування виникнення надмолекулярної будови у алкано-повітряній суміші; опір лише на структурну формулу мономерного стану не дає змоги досягти аналогічної точності прогнозування.

Використання коефіцієнта  $\beta$  дає змогу охарактеризувати зростання дифузійних ускладнень для важких молекул у готовій для горіння суміші, аналогічний ефект можна було б отримати у разі врахування молекулярної маси  $M$ . Частка зростання цих параметрів у гомологічному ряду алканів змінюється для  $\beta$  (на  $\Delta\beta = 1,5$  для гомологічних «сусідів») від 0,75 (метан) до 0,0517 (нонадекан), для  $M$  (на  $\Delta M = 14$ ) – від 0,875 (метан) до 0,0522 (нонадекан). Тобто вказані параметри загалом поводять себе ідентично з  $R=0,999$ .

**Висновки та напрями подальших досліджень.** За результатами аналізу зміни температур самоспалахування у гомологічному ряду n-алканів встановлено наявність нелінійної

залежності з елементами коливальності, що свідчить про існування для цих речовин у момент виникнення горіння надмолекулярної будови з різним принципом її організації для різних сполук, аналогічно властивостям речовини у конденсованому стані. Визначено механізм формування взаємозв'язку між нелінійністю зміни температури самоспалахування з будовою найменших можливих кластерів пероксидного типу. Для моменту ініціювання процесів самоспалахування враховано формування найпростішого алкілпероксидного кластера димерної будови, для метану – додатково гекса-, для етану – тримерної будови. Визначено усереднені еквівалентні довжини цих структур для суміші лінійних та циклічних алкілпероксидів. Отримано ряд значень модулюючих еквівалентних довжин, нелінійність зміни яких у гомологічному ряду н-алканів має аналогічний характер та визначає нелінійність зміни температури самоспалахування.

Отримані відомості щодо надмолекулярної будови в алканоповітряній суміші під час ініціювання самоспалахування дали змогу

розробити апроксимаційну аналітичну залежність, яка відображає її зміну у гомологічному ряду н-алканів з коефіцієнтом кореляції  $R=0,977$  та середнім відхиленням  $5,5$  °С. Такі результати свідчать про досягнення поставленої мети роботи, а саме – про уточнення пероксидного механізму розвитку самоспалахування завдяки моделюванню найменшої надмолекулярної пероксидної будови вуглеводнів, яка виникає на етапі ініціації зазначеного виду виникнення горіння.

Перспективним напрямом продовження зазначеного дослідження є з'ясування подальшої стадійності утворення алкілпероксидів. На цьому етапі було прийнято, що спочатку утворюється надмолекулярний кластер без руйнування молекулярної будови. За розвитку процесів самоспалахування може виділятися водень; наймовірніше, на температуру самоспалахування це не вплине, оскільки її визначає лише перший момент пероксидної кластеризації. Але виділення водню може бути ознакою розвитку процесів, що передують самовільному загорянню вугілля або наближенню метано-пилового викиду у шахті.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Основні положення процесу горіння. Виникнення процесу горіння / Тарахно О. В., Трегубов Д. Г., Жернокльов К. В., Коврегін В. В. Харків : НУЦЗУ, 2020. 408 с.
2. Davis S. G., Pagliaro J. L. Flammability and explosion characteristics of mildly. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2017. Vol. 49. P. 662–674.
3. New and reliable model for prediction of autoignition temperature of organic compounds containing energetic groups / Keshavarz N., Jafari M., Esmaeilpour K., Samiee M. *Process Safety and Environmental Prot.* 2018. Vol.113. P. 491–497.
4. Comparison of Group-Contribution and Machine Learning-based Property Prediction Models with Uncertainty Quantification / Aouichaoui A., Al R., Abildskov J., Sin G. *Computer Aided Chemical Engineering*. 2021. Vol. 50. P. 755–760.
5. Nazari B., Keshavarz M., Mobarhan M. The simplest method for reliable prediction of AIT of organic hydroxyl compounds to assess their process safety in industrial applications. *Process Safety and Env. Protection*. 2021. Vol. 148. P. 283–290.
6. Autoignition temperature: comprehensive data analysis and predictive models / Lozano S. et al. *QSAR in Environmental Research*. 2020. Vol.31(8). P. 597–613.
7. Трегубов Д. Г., Тарахно О. В., Кіреєв О. О. Вплив кластерної будови технічних сумішей рідин на значення характерних температур. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2018. № 28. С. 99–110.
8. Осциляційність характерних температур н-алканів внаслідок кластерної будови речовини / Трегубов Д. Г., Тарахно О. В., Соколов Д. Л., Трегубова Ф. Д. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2020. № 32. С. 14–30.
9. Impact of fuel molecular structure on autoignition behavior: design rules for future high performance gasolines / Boot M., Tian M., Hensen E., Mani S. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2017. Vol. 60. P. 1–25.
10. Numerical Investigation of Negative Temperature Coefficient Effects on Sooting Characteristics in a Laminar Co-flow Diffusion Flame / Wu H. et al. *ACS Omega*. 2021. Vol. 6. P. 15156–15167.
11. Quickly find chemical information. *PubChem. National Center for Biotechnology Information*: вебсайт. URL : <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/> (дата звернення : 20.01.2023).
12. Каїм С. Д. Кореляційна теорія нанокрапель і нанопор. Одеса : ВМВ, 2016. 95 с.
13. Термічний аналіз карбон-, силіцій- та нітрогенвмісних органічних пероксидів / Дібрівний В. М., Мельник Г. В., Кочубей В. В., Шевченко Д. С. *Хімія, технологія речовин та їх застосування*. 2018. № 1(2). С. 10–14.
14. Ковтуненко В., Величко Л. Синтетичні полімери. Конформація. *Біологія і хімія в рідній школі*. 2020. № 4. С. 2–6.

15. Прогнозування найменших надмолекулярних структур алканів нормальної та ізомерної будови / Трегубов Д. Г., Шаршанов А. Я., Соколов Д. Л., Трегубова Ф. Д. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2022. № 35. С. 63–75.

## REFERENCES

1. Tarakhno, O. V., Tregubov, D. G., Zhernoklev, K. V., & Kovregin, V. V. (2020). *Osnovni polozhennya protsesu horinnya. Vynyknennya protsesu horinnya* [The main provisions of the combustion process. The combustion process occurrence]. Kharkiv: NUZZU [in Ukrainian].
2. Davis, S. G., & Pagliaro, J. L. (2017). Flammability and explosion characteristics of mildly. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 49, 662–674. doi: 10.1016/j.jlp.2017.05.019 [in English].
3. Keshavarz, N., Jafari, M., Esmailpour, K., & Samiee, M. (2018). New and reliable model for prediction of autoignition temperature of organic compounds containing energetic groups. *Process Safety and Environmental Prot.*, 113, 491–497. doi: 10.1016/j.psep.2017.12.001 [in English].
4. Aouichaoui, A., Al, R., Abildskov, J., & Sin, G. (2021). Comparison of Group-Contribution and Machine Learning-based Property Prediction Models with Uncertainty Quantification. *Computer Aided Chemical Engineering*, 50, 755–760. doi: 10.1016/B978-0-323-88506-5.50118-2 [in English].
5. Nazari, B., Keshavarz, M., & Mobarhan, M. (2021). The simplest method for reliable prediction of AIT of organic hydroxyl compounds to assess their process safety in industrial applications. *Process Safety and Env. Protection*, 148, 283–290. doi: 10.1016/j.psep.2020.10.017 [in English].
6. Baskin I., Lozano, S., Durot M., Marcou G., Horvath D., & Varnek A. (2020). Autoignition temperature: comprehensive data analysis and predictive models. *QSAR in Environmental Research*, 31(8), 597–613. doi: 10.1080/1062936X.2020.1785933 [in English].
7. Tregubov, D. G., Tarakhno, O. V., & Kireev, O. O. (2018). Vplyv klasternoyi budovy tekhnichnykh sumishey ridyn na znachennya kharakternykh temperatur [Influence of cluster structure of liquids technical mixtures on the value of characteristic temperatures]. *Problems of emergency situations*, 28, 99–110. doi: 10.5281/zenodo.2598054 [in Ukrainian].
8. Tregubov, D. G., Tarakhno, O. V., Sokolov, D. L., & Tregubova, F. D. (2020). Ostslyatsiynist' kharakternykh temperatur n-alkaniv vnaslidok klasternoyi budovy rehovyny [The oscillation of n-alkanes characteristic temperatures under the action the cluster structure of substance]. *Problems of emergency situations*, 32, 14–30. doi: 10.5281/zenodo.4400131 [in Ukrainian].
9. Boot, M., Tian, M., Hensen, E., & Mani, S. (2017). Impact of fuel molecular structure on autoignition behavior: design rules for future high performance gasolines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 60, 1–25. doi: 10.1016/j.pecs.2016.12.001 [in English].
10. Wu, H., Hu, Z., Dong, X., Zhang, S., & Lin, Sh. (2021). Numerical Investigation of Negative Temperature Coefficient Effects on Sooting Characteristics in a Laminar Co-flow Diffusion Flame. *ACS Omega*, 6, 15156–15167. doi: 10.1021/acsomega.1c01397 [in English].
11. Quickly find chemical information. (2023, January 20). *PubChem. National Center for Biotechnology Information*. Retrieved from: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/> [in English].
12. Kaim, S. D. (2016). Korelyatsiyna teoriya nanokrapel' i nanopor [Correlation theory of nanodroplets and nanopores]. Odesa: VMV [in Ukrainian].
13. Dibrivnyi, V. M., Melnyk, G. V., Kochubei, V. V., & Shevchenko, D. S. (2018). Termichnyy analiz karbon-, sylitsiy- ta nitrohenvmisnykh orhanichnykh peroksydiv [The thermal analysis of carbon, silicon and nitrogen organic peroxides]. *Chemistry, technology and application of substances*, 1(2), 10–14. doi: 10.23939/ctas2018.02.010 [in Ukrainian].
14. Kovtunenکو, V., & Velychko, L. (2022). Syntetychni polimery. Konformatsiya [Synthetic polymers. Conformation]. *Biolojiya i khimiya v ridniy shkoli*, 4, 2–6 [in Ukrainian].
15. Trehubov, D. G., Sharshanov, A. Ya., Sokolov, D. L., & Trehubova, F. D. (2022). Prohnozuvannya naymenshykh nadmolekulyarnykh struktur alkaniv normal'noyi ta izomernoyi budovy [Forecasting the smallest super molecular formations for alkanes of normal and isomeric structure]. *Problems of Emergency Situations*, 35, 63–75. doi: 10.52363/2524-0226-2022-35-5 [in Ukrainian].

## PEROXIDE-CLUSTER MECHANISM OF THE AUTOIGNITION INITIATION

*D. Tregubov*

*National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine*

---

### KEYWORDS

autoignition,  
peroxide theory,  
oxidation,  
peroxide cluster,  
equivalent length,  
autoignition  
temperature.

### ANNOTATION

The paper examines the peroxide nature influence of the autoignition on this process phasing and the necessary changes in the method of the autoignition temperature calculation forecasting. The study is based on the assumption that the first elementary act that leads to autoignition is the supramolecular structure formation in the peroxide-type cluster form. The work aim is to model the smallest supramolecular peroxide structure of hydrocarbons that occurs at the first stage of autoginition in order to clarify the peroxide mechanism of the combustion this type development and increase the convergence of the autoginition temperature calculated prediction. N-alkanes were chosen as the basic homologous series for modeling such structures. Non-linearity with the oscillations presence for autoignition temperatures in this homologous series was established, which is a sign of the supramolecular structures existence with different principles of its organization for different compounds, that is observed for the condensed state of matter. For the first moment of the autoignition processes initiation, the formation mechanism of the relationship between the the autoignition temperature nonlinearity change and the structure of the smallest possible peroxide-type clusters is determined. The alkyl peroxide cluster formation with a dimeric structure is foreseen, and for methane – additionally with a hexa- and for ethane – with a trimeric structure. Average equivalent lengths of these structures for a mixture of linear and cyclic alkyl peroxides were calculated. This dependence modulates the non-linearity of the autoignition temperature change. An analytical dependence of an approximate nature was developed to describe the autoginition temperature, which works with a correlation coefficient of  $R=0.977$  and an average deviation of  $5.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . The work novelty is the predicted cluster mechanism of the autoignition initiation and the corresponding variants of possible peroxide-type supramolecular structures, which made it possible to develop a new analytical dependence for predicting the autoignition temperature based on the values of these structures equivalent lengths and the stoichiometric coefficient of the substance combustion reaction.

УДК 614.841.45

## ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ ПОЖЕЖІ НА ПРОМІЖОК ЧАСУ ЗБЕРЕЖЕНОСТІ ВОГНЕСТІЙКОСТІ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1.18-31>

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:

04.04.2023

Пройшла рецензування:

12.04.2023

### КЛЮЧОВІ СЛОВА:

вогнезахист, коефіцієнт теплопровідності, критична температура сталі, температурний режим, проміжок часу збереженості вогнестійкості, сталева конструкція, теплофізичні властивості.

### АНОТАЦІЯ

Дослідження присвячене оцінюванню співвідношення між значеннями проміжку часу збереженості вогнестійкості захищених сталевих конструкцій, отриманими для умов вогневого впливу за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожежі, та значеннями цього проміжку часу для стандартного температурного режиму. За мету ставилось виявлення впливу номінальних температурних режимів пожежі на проміжок часу збереженості вогнестійкості таких сталевих конструкцій, як балки і колони з одношаровою системою вогнезахисту, для широких діапазонів параметрів цих конструкцій. Розрахунковим методом, який ґрунтується на розв'язуванні прямої одномірної задачі теплопровідності, визначено дані щодо проміжку часу збереженості вогнестійкості таких сталевих конструкцій для температурних режимів вуглеводневої та зовнішньої пожежі і дані щодо різниці між цими отриманими значеннями зі значеннями такого ж проміжку часу для стандартного температурного режиму. Встановлено, що для діапазону параметрів сталевих конструкцій, що оцінено, проміжок часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі змінюється в діапазоні від 12,5 хв до 219,0 хв, який є вужчим за діапазон для стандартного температурного режиму, що становить від 30 хв до 240 хв. Для температурного режиму зовнішньої пожежі цей діапазон складає від 33,3 хв до 500,1 хв, і він ширший, ніж для стандартного температурного режиму. Визначено, що різниця між значеннями проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій, отриманими для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі, і значеннями такого ж проміжку часу за стандартного температурного режиму змінюється в діапазоні від -8,8% до -58,3%, а така ж різниця для температурного режиму зовнішньої пожежі – в діапазоні від 11,0% до 108,4%. З'ясовано, що на величину цієї різниці значно впливає значення проміжку часу збереженості вогнестійкості за стандартного температурного режиму, щодо якого цю різницю визначають. Закономірним є те, що з підвищенням цього проміжку часу ця різниця для температурного режиму вуглеводневої пожежі зменшується (за модулем), а для температурного режиму зовнішньої пожежі вона збільшується. Встановлено також вплив коефіцієнта теплопровідності застосованого вогнезахисного матеріалу, коефіцієнта поперечного перерізу і критичної температури сталі на величину цієї різниці.

**Постановка проблеми.** Відповідно до національної нормативної бази України загальні вимоги до вогнестійкості

будівельних конструкцій надано в ДБН В 1.1-7 [1]. У цих будівельних нормах наведено мінімальні класи вогнестійкості

будівельних конструкцій для будівель різних ступенів вогнестійкості. Зокрема, висунуто вимоги до мінімального класу вогнестійкості для балок (від R 15 до R 60) і колон (від R 15 до R 150) для умов вогневого впливу на них за стандартного температурного режиму [2]. Згідно з цими вимогами здійснюють вогнезахисне оброблення будівельних конструкцій, що має забезпечити збереженість їхньої вогнестійкості протягом проміжку часу вогневого впливу, який є не меншим за нормоване значення проміжку часу, зазначене в класі вогнестійкості цієї конструкції, наприклад 60 хв для класу R 60. Водночас фактична товщина вогнезахисту має бути не меншою мінімальної товщини вогнезахисту, необхідної для забезпечення нормованого класу вогнестійкості конструкції.

Для сталевих конструкцій без огорожувальної функції, таких як балки і колони, за методами, наведеними в EN 13381-4 [3] і EN 13381-8 [4], визначають залежності між проміжком часу збереженості їхньої вогнестійкості, товщиною їхнього вогнезахисту та іншими параметрами сталевих конструкцій, оснащених пасивними і реактивними системами вогнезахисту. Ці залежності встановлюють для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму [2]. В той же час положення, наведені в ДБН В 1.1-7 [1], Єврокод 1 [5], Єврокод 3 [6] і національному стандарті [7], передбачають встановлення вимог до вогнестійкості сталевих конструкцій за іншими, ніж стандартний, номінальними температурними режимами – за режимами вуглеводневої і зовнішньої пожежі [8]. Однак конкретних вимог до проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій за цими альтернативними номінальними температурними режимами пожежі в чинних національних нормах не встановлено.

З аналізу рівнів теплового впливу на захищені сталеві конструкції, які спостерігаються в умовах різних номінальних температурних режимів

пожежі, наведеному в роботі [9], впливає, що сталеві конструкції з товщиною вогнезахисту, яка відповідає необхідній мінімальній товщині, визначеній для стандартного температурного режиму, будуть мати зменшений щодо стандартного режиму проміжок часу збереженості вогнестійкості для режиму вуглеводневої пожежі й збільшений – для режиму зовнішньої пожежі. Проте даних щодо співвідношення між значеннями цього проміжку, визначеними для різних номінальних температурних режимів пожежі й широких діапазонів параметрів сталевих конструкцій (теплофізичних властивостей застосовного вогнезахисного матеріалу, товщини вогнезахисту, критичної температури сталі і коефіцієнта поперечного перерізу конструкції) в джерелах інформації не наведено. Через це, зважаючи на необхідність оцінювання суттєвих експлуатаційних характеристик сталевих конструкцій для різних температурних режимів умовної пожежі, актуальним слід вважати дослідження, спрямоване на виявлення впливу номінальних температурних режимів пожежі на проміжок часу збереженості їхньої вогнестійкості.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проміжок часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій визначають за експериментальними або розрахунковими методами. Для таких сталевих конструкцій, як балки і колони, експериментальні методи наведено в EN 13381-4 [3], EN 13381-8 [4], EN 1365-3 [10], EN 1365-4 [11], а розрахункові методи – в EN 1993-1-2 [6] і ДСТУ-Н Б В.2.6-211 [7].

Результатами, отриманими за EN 13381-4 [3] і EN 13381-8 [4], є залежності між проміжком часу збереженості вогнестійкості й необхідною мінімальною товщиною вогнезахисту сталевих конструкцій, що мають профіль двотавру, або порожнистих конструкцій. Ці результати наведено в документах, які стосуються оцінки відповідності систем вогнезахисту, призначених для сталевих

конструкцій, серед яких протоколи випробувань і класифікації за вогнестійкістю, сертифікати, та в різних джерелах інформації. Наприклад, в аналітичних оглядах [12–13] застосованих в Україні у 2019–2022 рр. засобів вогнезахисту для сталевих балок і колон такі результати надано для шести пасивних систем вогнезахисту і п'ятнадцяти реактивних систем вогнезахисту. З аналізу наведених в цих оглядах даних випливає, що для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму для зазначених пасивних систем вогнезахисту діапазон проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій складає від 45 хв до 240 хв, а діапазон необхідної мінімальної товщини вогнезахисту – від 7 мм до 81 мм. Для реактивних систем вогнезахисту діапазон проміжку часу збереженості вогнестійкості вужчий, ніж для пасивних систем, і складає від 30 хв до 120 хв. Водночас значення необхідної мінімальної товщини реактивного вогнезахисту значно менші, ніж для пасивного вогнезахисту, і перебувають в діапазоні від 0,180 мм до 8,989 мм.

У роботі [14] наведено результати розрахункового оцінювання вогнестійкості в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму захищеної сталеві балки, на яку спирається бетонна плита перекриття, яке проведене за ДСТУ-Н Б В.2.6-211 [7]. Показано вплив товщини вогнезахисту на температурний стан сталеві балки для певного значення проміжку часу збереженості її вогнестійкості.

За результатами дослідження, виконаного в роботі [15], для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму визначено розрахункові залежності між проміжком часу збереженості вогнестійкості сталеві конструкції, необхідною мінімальною товщиною її вогнезахисту, коефіцієнтом поперечного перерізу і коефіцієнтом теплопровідності застосованих вогнезахисних матеріалів. Встановлено дані щодо співвідношення між значеннями

необхідної мінімальної товщини вогнезахисту, визначеними для одношарових і багатошарових систем вогнезахисту, призначених для сталевих конструкцій.

У роботі [16] наведено дані щодо співвідношення між проміжком часу досягнення різної критичної температури сталі, визначеним для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму, і проміжком часу досягнення критичної температури, отриманим за температурного режиму вуглеводневої пожежі. З'ясовано, що для незахищених сталевих конструкцій різниця у цих проміжках часу досягає 60%. Також показано, що для сталевих конструкцій, оснащених вогнезахисними матеріалами двох певних торговельних марок, проміжок часу досягнення критичної температури сталі за температурного режиму вуглеводневої пожежі менший (на 17–59%), ніж за стандартного температурного режиму.

Результати оцінювання теплового стану сталеві пластини завтовшки 5 мм з вогнезахисним покриттям «Amotherm Steel Wb» для різних умов вогневого впливу показують, що у разі товщини покриття 0,42 мм проміжок часу досягнення температури 500 °C за стандартного температурного режиму в 1,9 раза більший, ніж за температурного режиму вуглеводневої пожежі [17].

За результатами дослідження, проведеного в роботі [9], визначено розрахункові дані щодо необхідної мінімальної товщини одношарового вогнезахисту сталевих конструкцій для температурних режимів вуглеводневої та зовнішньої пожежі і дані щодо різниці між цими отриманими значеннями товщини з необхідною мінімальною товщиною, встановленою для стандартного температурного режиму. Показано, що значення необхідної мінімальної товщини вогнезахисту, які отримано для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі, більші (на 5,74–214%), ніж за стандартного температурного режиму, в той час як



значення цієї товщини для умов вогневого впливу за температурного режиму зовнішньої пожежі менші (на 7,52–64,7%), ніж за стандартного температурного режиму.

Наведені вище результати досліджень дають змогу обґрунтовано підходити до визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій для сценарію умовної пожежі у разі вогневого впливу за стандартного температурного режиму. В зазначених дослідженнях для цього вогневого впливу наведено залежності між цим проміжком часу і параметрами сталевих конструкцій з одношаровою і багатошаровою системами вогнезахисту, а також дані щодо значення цього проміжку часу для сталевих конструкцій, оснащених вогнезахисними матеріалами певних торговельних марок. Однак у результатах цих досліджень немає залежності та даних щодо проміжку часу збереженості вогнестійкості захищених сталевих конструкцій, що визначені для широкого діапазону їхніх параметрів, які стосуються вогневого впливу за іншими номінальними температурними режимами пожежі. Також бракує даних щодо співвідношення значень цього проміжку часу, отриманих за різними номінальними режимами, для широких діапазонів параметрів сталевих конструкцій (теплофізичних властивостей застосовного вогнезахисного матеріалу, товщини вогнезахисту, критичної температури сталі і коефіцієнта поперечного перерізу конструкції). Така невизначеність щодо проміжку часу збереженості вогнестійкості 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 проміжок часу збереженості вогнестійкості таких сталевих конструкцій, як балки і колони з одношаровою системою вогнезахисту, для широких діапазонів параметрів цих конструкцій

(теплофізичних властивостей застосовного вогнезахисного матеріалу, товщини вогнезахисту, критичної температури сталі та коефіцієнта поперечного перерізу конструкції).

Для досягнення цієї мети було поставлено такі завдання:

– для умов вогневого впливу за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожежі визначити дані щодо проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій з одношаровою системою вогнезахисту за такими параметрами цих конструкцій, за якими в роботі [15] оцінено необхідну мінімальну товщину вогнезахисту цієї системи за стандартного температурного режиму;

– для сталевих конструкцій з одношаровою системою вогнезахисту визначити різницю між значеннями проміжку часу збереженості їхньої вогнестійкості, отриманими для умов вогневого впливу за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожежі, і значеннями такого проміжку часу, визначеними за стандартного температурного режиму;

– для умов вогневого впливу за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожежі визначити залежності цієї різниці між проміжками часу збереженості вогнестійкості від параметрів сталеві конструкції з одношаровою системою вогнезахисту (теплофізичних властивостей застосовного вогнезахисного матеріалу, товщини вогнезахисту, критичної температури сталі, коефіцієнта поперечного перерізу і проміжку часу збереженості вогнестійкості захищеної сталеві конструкції за стандартного температурного режиму).

**Методи дослідження.** Застосовано метод дослідження, складовими якого є обчислювальна процедура чисельного моделювання теплового стану сталевих конструкцій, оснащених вогнезахисним матеріалом із заданими теплофізичними властивостями, в умовах вогневого впливу за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожежі, процедури аналізу, порівняння,

узагальнення та систематизації отриманих розрахункових даних. Для розрахунку теплового стану захищених сталевих конструкцій в умовах вогневого впливу (температури сталі для різної тривалості вогневого впливу) використано одномірну двошарову математичну модель теплопровідності, яка складається із системи рівнянь, наведеної в [15]. Значення коефіцієнтів тепловіддачі конвекцією і теплового випромінювання на обігрівній поверхні вогнезахисту, теплофізичні властивості сталі та інші параметри цієї моделі вибрані такими, як наведено в [5; 7]. Розв'язання математичної моделі й прямої задачі теплопровідності з визначення температури сталі виконано методом кінцевих різниць за неявною схемою апроксимації із використанням пакету прикладних програм FRIEND [18].

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Процедуру визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевій конструкції ( $t_{fr,HC}$  – для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі і  $t_{fr,ef}$  – для температурного режиму зовнішньої пожежі) з одношаровою системою вогнезахисту для певних значень теплофізичних властивостей застосовного вогнезахисного матеріалу (його коефіцієнта теплопровідності  $\lambda_p$  і питомої теплоємності  $c_p\rho_p$ ), товщини вогнезахисту  $d_{p,min}$ , критичної температури сталі  $\theta_{cr}$ ,

коефіцієнта поперечного перерізу захищеної сталевій конструкції  $A_p/V$  для умов вогневого впливу за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожежі було вибрано такою.

Для температурних режимів вуглеводневої і зовнішньої пожежі і одношарової системи вогнезахисту з товщиною  $d_{p,min}$  через розв'язання прямої задачі теплопровідності визначали проміжок часу ( $t_{fr,HC}$  або  $t_{fr,ef}$ ), за якого розрахункова температура сталевій конструкції  $\theta_{a,cal}$  із коефіцієнтом поперечного перерізу  $A_p/V$  дорівнює критичній температурі сталі  $\theta_{cr}$ . Цей розрахунок виконували для значень  $d_{p,min}$ ,  $A_p/V$ ,  $\theta_{cr}$  і  $\lambda_p$ , наведених у табл. 1, і  $c_p\rho_p = 500$  кДж/(м<sup>3</sup>·°С) ( $c_p = 1000$  Дж/(кг·°С),  $\rho_p = 500$  кг/м<sup>3</sup>). Зазначені таблиця і дані щодо питомої теплоємності вогнезахисного матеріалу взято з роботи [15]. У цій таблиці наведено дані щодо необхідної мінімальної товщини одношарової системи вогнезахисту  $d_{p,min}$ , отримані для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму за такими параметрами сталевій конструкції:  $\theta_{cr,min} = 350$  °С;  $\theta_{cr,med} = 500$  °С;  $\theta_{cr,max} = 700$  °С;  $t_{fr,min} = 30$  хв;  $t_{fr,med} = 90$  хв;  $t_{fr,max} = 240$  хв. Наявні прочерки в табл. 1 пов'язані з тим, що для зазначених параметрів ( $A_p/V$ ,  $\theta_{cr,max}$ ,  $t_{fr,min}$ ) сталева конструкція не потребує вогнезахисту.

Таблиця 1 – Дані щодо необхідної мінімальної товщини вогнезахисту, отримані для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму [15]

$A_p/V$ , м <sup>-1</sup>	$\lambda_p$ , Вт/(м·°С)	Необхідна мінімальна товщина вогнезахисту $d_{p,min}$ (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

Отримані шляхом розв'язання прямої задачі теплопровідності розрахункові значення проміжків часу  $t_{fr,HC}$  та  $t_{fr,ef}$

наведено в табл. 2 і 3. В цих таблицях  $d_{p,min,30}$ ,  $d_{p,min,90}$ ,  $d_{p,min,240}$  – це значення товщини вогнезахисту, які дорівнюють

величинам необхідної мінімальної товщини вогнезахисту  $d_{p,min}$  (див. табл. 1), отриманим для стандартного температурного режиму і проміжків часу вогневого впливу  $t_{fr,min} = 30$  хв,  $t_{fr,med} = 90$  хв,  $t_{fr,max} = 240$  хв відповідно. Наявні прочерки в табл. 3 пов'язані з тим,

що для температурного режиму зовнішньої пожежі максимальне значення температури газового середовища складає  $680\text{ }^{\circ}\text{C}$  і через це для цього режиму сталева конструкція не може досягнути температури  $\theta_{cr,max} = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Таблиця 2 – Дані щодо проміжку часу збереженості вогнестійкості  $t_{fr,HC}$ , отримані для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі

$A_p/V,$ $M^{-1}$	$\lambda_p,$ $Вт/(M\cdot^{\circ}C)$	Проміжок часу $t_{fr,HC}$ (у хв) для:								
		$\theta_{cr,min},$ $d_{p,min,30}$	$\theta_{cr,med},$ $d_{p,min,30}$	$\theta_{cr,max},$ $d_{p,min,30}$	$\theta_{cr,min},$ $d_{p,min,90}$	$\theta_{cr,med},$ $d_{p,min,90}$	$\theta_{cr,max},$ $d_{p,min,90}$	$\theta_{cr,min},$ $d_{p,min,240}$	$\theta_{cr,med},$ $d_{p,min,240}$	$\theta_{cr,max},$ $d_{p,min,240}$
40	0,02	17,4	14,5	–	68,3	65,5	58,9	219,0	219,0	218,2
150	0,02	18,9	17,1	12,8	69,4	67,0	61,1	219,0	219,0	217,4
300	0,02	19,3	17,6	13,4	70,2	67,5	61,8	217,7	217,4	217,3
40	0,2	17,2	14,4	–	68,5	66,3	58,8	217,9	217,8	217,6
150	0,2	19,0	17,1	12,7	70,3	67,4	61,3	216,9	216,4	215,5
300	0,2	19,8	17,7	13,4	71,2	68,3	62,1	218,1	216,0	214,5
40	2,0	16,9	14,2	–	68,7	65,1	58,5	215,3	214,7	214,7
150	2,0	18,9	16,9	12,5	70,2	66,9	61,5	215,8	214,1	213,4
300	2,0	19,3	17,4	13,3	70,6	67,7	61,7	215,7	214,2	212,3

Таблиця 3 – Дані щодо проміжку часу збереженості вогнестійкості  $t_{fr,ef}$ , отримані для умов вогневого впливу за температурного режиму зовнішньої пожежі

$A_p/V,$ $M^{-1}$	$\lambda_p,$ $Вт/(M\cdot^{\circ}C)$	Проміжок часу $t_{fr,ef}$ (у хв) для:								
		$\theta_{cr,min},$ $d_{p,min,30}$	$\theta_{cr,med},$ $d_{p,min,30}$	$\theta_{cr,max},$ $d_{p,min,30}$	$\theta_{cr,min},$ $d_{p,min,90}$	$\theta_{cr,med},$ $d_{p,min,90}$	$\theta_{cr,max},$ $d_{p,min,90}$	$\theta_{cr,min},$ $d_{p,min,240}$	$\theta_{cr,med},$ $d_{p,min,240}$	$\theta_{cr,max},$ $d_{p,min,240}$
40	0,02	36,7	41,0	–	133,4	154,8	–	419,3	500,1	–
150	0,02	35,1	38,2	–	129,0	149,4	–	394,0	479,4	–
300	0,02	34,7	37,7	–	124,1	145,5	–	367,9	452,7	–
40	0,2	36,3	40,5	–	132,0	155,9	–	401,2	488,1	–
150	0,2	34,5	37,9	–	121,1	143,2	–	356,8	437,5	–
300	0,2	33,8	36,8	–	116,5	136,6	–	347,4	418,6	–
40	2,0	35,9	40,5	–	126,4	150,1	–	367,1	453,5	–
150	2,0	33,7	37,1	–	117,0	136,4	–	347,9	418,5	–
300	2,0	33,3	36,2	–	115,8	134,5	–	345,6	414,0	–

Із аналізу даних, наведених у табл. 2, 3, випливає, що для діапазону параметрів сталевих конструкцій, який оцінено, проміжок часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі змінюється від 12,5 хв до 219,0 хв, а для температурного режиму зовнішньої пожежі – від 33,3 хв до 500,1 хв. Для температурного режиму вуглеводневої пожежі діапазон проміжку часу збереженості вогнестійкості є вужчим, ніж для стандартного температурного режиму, який становить від 30 хв до 240 хв. Для

температурного режиму зовнішньої пожежі цей діапазон ширший, ніж для стандартного температурного режиму.

У табл. 4, 5 наведено дані щодо різниці між значеннями проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій ( $t_{fr,HC}$  та  $t_{fr,ef}$ ), отриманими для умов вогневого впливу за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожежі (див. табл. 2, 3), і значеннями такого ж проміжку часу  $t_{fr}$  ( $t_{fr,min} = 30$  хв;  $t_{fr,med} = 90$  хв;  $t_{fr,max} = 240$  хв) для стандартного температурного режиму. Цю різницю розраховували за такими формулами:

$$\delta_{t,HC} = 100(t_{fr,HC} - t_{fr})/t_{fr}; \quad (1)$$

$$\delta_{t,ef} = 100(t_{fr,ef} - t_{fr})/t_{fr}; \quad (2)$$

де  $\delta_{t,HC}$  – різниця між значенням проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевій конструкції, отриманим для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі, і значенням цього проміжку часу за стандартного температурного режиму, %;

$\delta_{t,ef}$  – різниця між значенням проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевій конструкції, отриманим для умов вогневого впливу за температурного режиму зовнішньої

пожежі, і значенням цього проміжку часу за стандартного температурного режиму, %;

$t_{fr,HC}$  і  $t_{fr,ef}$  – значення проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевій конструкції, отримані для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі й за температурного режиму зовнішньої пожежі, які наведено в табл. 2, 3, хв;

$t_{fr}$  – значення проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевій конструкції для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму, яке наведене в табл. 1 ( $t_{fr,min} = 30$  хв;  $t_{fr,med} = 90$  хв;  $t_{fr,max} = 240$  хв), хв.

Таблиця 4 – Дані щодо різниці  $\delta_{t,HC}$

$A_p/V$ , $M^{-1}$	$\lambda_p$ , Вт/(м·°С)	Різниця $\delta_{t,HC}$ (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	-42,0	-51,7	-	-24,1	-27,2	-34,6	-8,8	-8,8	-9,1
150	0,02	-37,0	-43,0	-57,3	-22,9	-25,6	-32,1	-8,8	-8,8	-9,4
300	0,02	-35,7	-41,3	-55,3	-22,0	-25,0	-31,3	-9,3	-9,4	-9,5
40	0,2	-42,7	-52,0	-	-23,9	-26,3	-34,7	-9,2	-9,3	-9,3
150	0,2	-36,7	-43,0	-57,7	-21,9	-25,1	-31,9	-9,6	-9,8	-10,2
300	0,2	-34,0	-41,0	-55,3	-20,9	-24,1	-31,0	-9,1	-10,0	-10,6
40	2,0	-43,7	-52,7	-	-23,7	-27,7	-35,0	-10,3	-10,5	-10,5
150	2,0	-37,0	-43,7	-58,3	-22,0	-25,7	-31,7	-10,1	-10,8	-11,1
300	2,0	-35,7	-42,0	-55,7	-21,6	-24,8	-31,4	-10,1	-10,8	-11,5

Таблиця 5 – Дані щодо різниці  $\delta_{t,ef}$

$A_p/V$ , $M^{-1}$	$\lambda_p$ , Вт/(м·°С)	Різниця $\delta_{t,ef}$ (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	22,3	36,7	-	48,2	72,0	-	74,7	108,4	-
150	0,02	17,0	27,3	-	43,3	66,0	-	64,2	99,8	-
300	0,02	15,7	25,7	-	37,9	61,7	-	53,3	88,6	-
40	0,2	21,0	35,0	-	46,7	73,2	-	67,2	103,4	-
150	0,2	15,0	26,3	-	34,6	59,1	-	48,7	82,3	-
300	0,2	12,7	22,7	-	29,4	51,8	-	44,8	74,4	-
40	2,0	19,7	35,0	-	40,4	66,8	-	53,0	89,0	-
150	2,0	12,3	23,7	-	30,0	51,6	-	45,0	74,4	-
300	2,0	11,0	20,7	-	28,7	49,4	-	44,0	72,5	-

Із аналізу даних, наведених у табл. 4, випливає, що різниця  $\delta_{t,HC}$  між значенням проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевій конструкції  $t_{fr,HC}$ , отриманим для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі, і значенням цього проміжку часу  $t_{fr}$  за стандартного температурного режиму залежить від коефіцієнта теплопровідності застосовного вогнезахисного матеріалу  $\lambda_p$ , коефіцієнта

поперечного перерізу  $A_p/V$ , критичної температури сталі  $\theta_{cr}$  і проміжку часу  $t_{fr}$  та змінюється в діапазоні від 8% до 58,3%. Найбільший вплив на її величину має значення проміжку часу  $t_{fr}$ , з підвищенням якого різниця  $\delta_{t,HC}$  (за модулем) суттєво зменшується. Найбільші (за модулем) значення (від 34,0% до 58,3%) різниці  $\delta_{t,HC}$  має для проміжку часу  $t_{fr,min} = 30$  хв, найменші (від 8,8% до 11,5%)

– для  $t_{fr,max} = 240$  хв. Вплив коефіцієнта теплопровідності застосовного вогнезахисного матеріалу  $\lambda_p$  на різницю  $\delta_{t,HC}$  спостерігається тільки для проміжку часу  $t_{fr}$ , який складає 240 хв, проте він не суттєвий. Вплив коефіцієнта поперечного перерізу  $A_p/V$  і критичної температури  $\theta_{cr}$  на різницю  $\delta_{t,HC}$  є значним для проміжку часу  $t_{fr,min} = 30$  хв, а з підвищенням цього проміжку часу він слабкішає. Зокрема, за  $(A_p/V)_{med} = 150 \text{ м}^{-1}$ ,  $\theta_{cr,med} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$  і підвищенні проміжку часу  $t_{fr}$  від 30 хв до 240 хв різниця  $\delta_{t,HC}$  зменшується (за модулем): від 43,0% до 8,8% – для  $\lambda_p = 0,02 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ ; від 43,0% до 9,8% – для  $\lambda_p = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ ; від 43,7% до

10,8% – для  $\lambda_p = 2,0 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$  (рис. 1а). За  $\lambda_p = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ ,  $\theta_{cr,med} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$  і підвищенні коефіцієнта поперечного перерізу  $A_p/V$  від  $40 \text{ м}^{-1}$  до  $300 \text{ м}^{-1}$  різниця  $\delta_{t,HC}$  змінюється: від 52,0% до 41,0% – для  $t_{fr,min} = 30$  хв; від 26,3% до 24,1% – для  $t_{fr,med} = 90$  хв; від 9,3% до 10,0% – для  $t_{fr,max} = 240$  хв (рис. 1б). За  $\lambda_p = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ ,  $(A_p/V)_{med} = 150 \text{ м}^{-1}$  і підвищенні критичної температури сталі  $\theta_{cr}$  від  $350 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  різниця  $\delta_{t,HC}$  збільшується: від 36,7% до 57,7% – для  $t_{fr,min} = 30$  хв; від 21,9% до 31,9% – для  $t_{fr,med} = 90$  хв; від 9,6% до 10,2% – для  $t_{fr,max} = 240$  хв (рис. 1в).

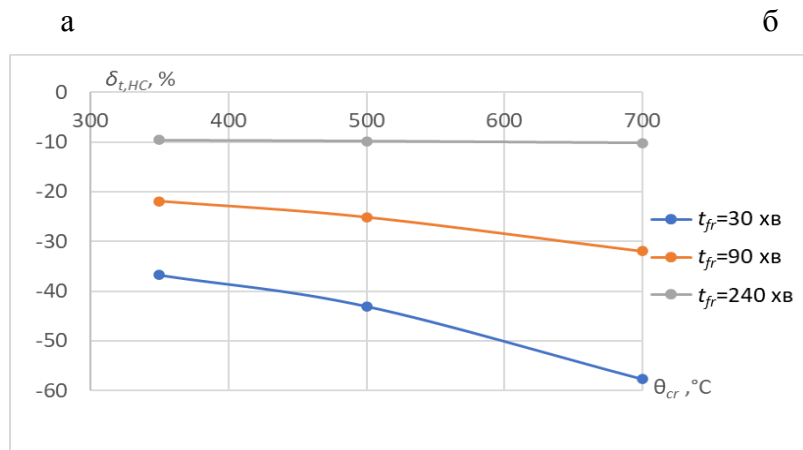
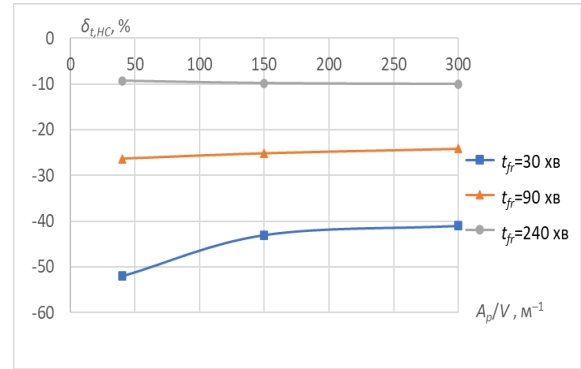
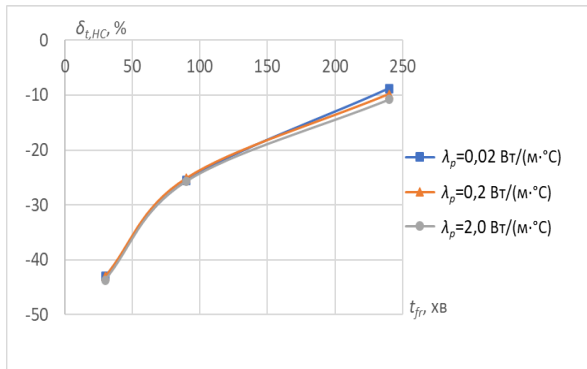


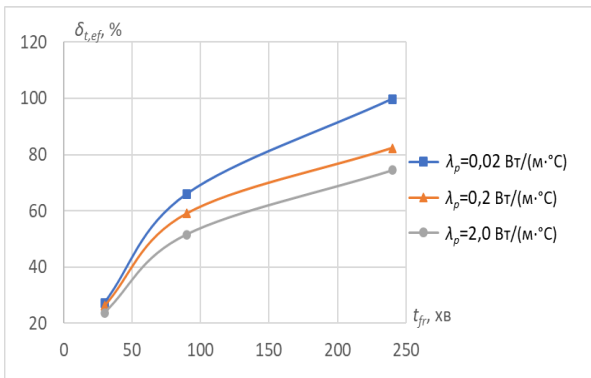
Рисунок 1 – Залежності різниці  $\delta_{t,HC}$  від проміжку часу  $t_{fr}$  (а), коефіцієнта поперечного перерізу  $A_p/V$  (б) і критичної температури сталі  $\theta_{cr}$  (в)

Із аналізу даних, наведених у табл. 5, випливає, що різниця  $\delta_{t,ef}$  між значенням проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевій конструкції  $t_{fr,ef}$ , отриманим для умов вогневого впливу за температурного режиму зовнішньої пожежі, і значенням цього проміжку часу  $t_{fr}$  за стандартного температурного режиму, залежить від

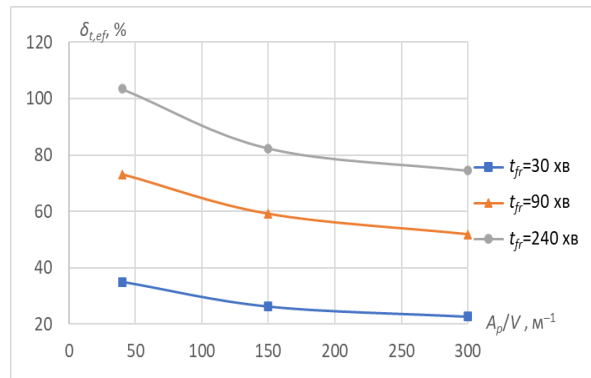
коефіцієнта теплопровідності застосовного вогнезахисного матеріалу  $\lambda_p$ , коефіцієнта поперечного перерізу  $A_p/V$ , критичної температури сталі  $\theta_{cr}$  і проміжку часу  $t_{fr}$  та змінюється в діапазоні від 11,0% до 108,4%. Найбільший вплив на її величину має значення проміжку часу  $t_{fr}$ , з підвищенням якого різниця  $\delta_{t,ef}$  суттєво

збільшується. Найменші значення (від 11,0% до 36,7%) різниця  $\delta_{t,ef}$  має для проміжку часу  $t_{fr,min} = 30$  хв, найбільші (від 44,0% до 108,4%) – для  $t_{fr,max} = 240$  хв. Із підвищенням  $\lambda_p$ ,  $A_p/V$  і зі зменшенням  $\theta_{cr}$  різниця  $\delta_{t,ef}$  зменшується. Зокрема, за  $(A_p/V)_{med} = 150 \text{ м}^{-1}$ ,  $\theta_{cr,med} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$  і підвищенні проміжку часу  $t_{fr}$  від 30 хв до 240 хв різниця  $\delta_{t,ef}$  збільшується: від 27,3% до 99,8% – для  $\lambda_p = 0,02 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ ; від 26,3% до 82,3% – для  $\lambda_p = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ ; від 23,7% до 74,4% – для  $\lambda_p = 2,0 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$  (рис. 2а). За  $\lambda_p = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ ,

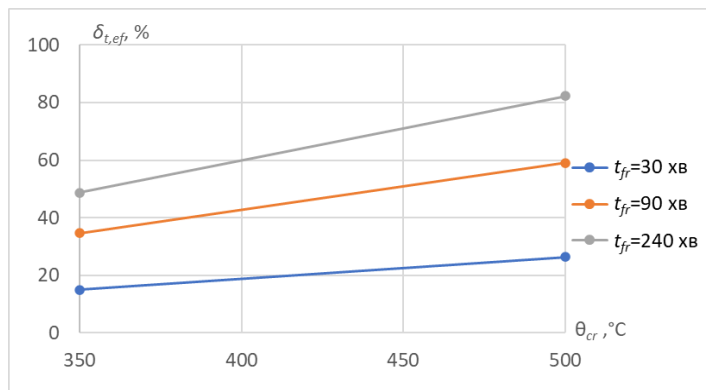
$\theta_{cr,med} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$  і підвищенні коефіцієнта поперечного перерізу  $A_p/V$  від  $40 \text{ м}^{-1}$  до  $300 \text{ м}^{-1}$  різниця  $\delta_{t,ef}$  зменшується: від 35,0% до 22,7% – для  $t_{fr,min} = 30$  хв; від 73,2% до 51,8% – для  $t_{fr,med} = 90$  хв; від 103,4% до 74,4% – для  $t_{fr,max} = 240$  хв (рис. 2б). У разі  $\lambda_p = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ ,  $(A_p/V)_{med} = 150 \text{ м}^{-1}$  і підвищення критичної температури сталі  $\theta_{cr}$  від  $350 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  різниця  $\delta_{t,ef}$  збільшується: від 15,0% до 26,3% – для  $t_{fr,min} = 30$  хв; від 34,6% до 59,1% – для  $t_{fr,med} = 90$  хв; від 48,7% до 82,3% – для  $t_{fr,max} = 240$  хв (рис. 2в).



а



б



в

Рисунок 2 – Залежності різниці  $\delta_{t,ef}$  від проміжку часу  $t_{fr}$  (а), коефіцієнта поперечного перерізу  $A_p/V$  (б) і критичної температури сталі  $\theta_{cr}$  (в)

Отримані дані щодо різниці між значеннями проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевій конструкції з одношаровою системою вогнезахисту, визначені для умов вогневого впливу за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожеж, і значеннями такого проміжку часу за стандартного температурного режиму, які наведено в табл. 4, 5, дають змогу

стверджувати таке:

– ця різниця для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі має від’ємні значення (проміжок часу збереженості вогнестійкості сталевій конструкції за температурного режиму вуглеводневої пожежі менший, ніж за стандартного температурного режиму), а для температурного режиму зовнішньої

пожежі – позитивні значення (цей проміжок часу за температурного режиму зовнішньої пожежі більший, ніж за стандартного температурного режиму);

– на величину цієї різниці як для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі, так і для умов вогневого впливу за температурного режиму зовнішньої пожежі, значно впливає значення проміжку часу збереженості вогнестійкості  $t_{fr}$  за стандартного температурного режиму, щодо якого цю різницю визначають (див. формули (1), (2)). Закономірним є те, що з підвищенням проміжку часу  $t_{fr}$  для температурного режиму вуглеводневої пожежі різниця  $\delta_{i,HC}$  зменшується, а для температурного режиму зовнішньої пожежі різниця  $\delta_{i,ef}$  збільшується. Це зумовлено відмінністю у рівнях теплового впливу на захищену сталеву конструкцію, які спостерігаються за умов різних номінальних температурних режимів. Цей рівень визначається тепловим потоком на обігрівній поверхні конструкції, величина якого залежить від температури газового середовища  $\theta_g$ , і проміжком часу вогневого впливу. Кількість теплоти, яка надходить до конструкції за певний проміжок часу вогневого впливу, прямо пропорційна площі під залежністю температури газового середовища  $\theta_g$  від проміжку часу вогневого впливу  $t$ . У роботі [15] показано, що різниця  $\delta_{A,HC}$  між площами під залежностями температури газового середовища  $\theta_g(t)$ , отриманими для температурного режиму вуглеводневої пожежі й для стандартного температурного режиму, із підвищенням проміжку часу вогневого впливу від 30 хв до 240 хв зменшується від 44,3% до 8,4%. Для температурного режиму зовнішньої пожежі така різниця  $\delta_{A,ef}$  збільшується (за модулем) від -9,3% (для  $t = 30$  хв) до -32,9% (для  $t = 240$  хв);

– 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 поперечного перерізу  $A_p/V$  і зі

зменшенням критичної температури сталі  $\theta_{cr}$  зменшується. З підвищенням проміжку часу  $t_{fr}$  для температурного режиму вуглеводневої пожежі вплив  $A_p/V$  і  $\theta_{cr}$  на різницю  $\delta_{d,HC}$  зменшується. Для цього ж режиму пожежі вплив коефіцієнта теплопровідності  $\lambda_p$  застосовного вогнезахисного матеріалу  $\lambda_p$  на різницю  $\delta_{i,HC}$  спостерігається тільки для проміжку часу  $t_{fr} = 240$  хв, за якого підвищення  $\lambda_p$  призводить до незначного збільшення  $\delta_{i,HC}$ . Для температурного режиму зовнішньої пожежі з підвищенням  $\lambda_p$  різниця  $\delta_{d,ef}$  зменшується, а з підвищенням проміжку часу  $t_{fr}$  цей вплив збільшується.

Такі висновки можуть вважатися за доцільні з практичного погляду, тому що дають змогу обґрунтовано підходити до оцінювання проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій для умов вогневого впливу за іншими номінальними температурними режимами пожежі, ніж стандартний. Для сталевих конструкцій з товщиною вогнезахисту, яка відповідає мінімальній товщині, необхідній за збереженості їхньої вогнестійкості впродовж певного проміжку часу вогневого впливу, визначеній за стандартного температурного режиму, вони дають змогу спрогнозувати величину зменшення цього проміжку часу для вуглеводневої пожежі і його збільшення для зовнішньої пожежі.

З погляду теорії вони дають змогу стверджувати про визначеність впливу номінальних температурних режимів пожежі на проміжок часу збереженості вогнестійкості таких сталевих конструкцій, як балки і колони з одношаровою системою вогнезахисту, що є певними перевагами проведеного дослідження. Однак варто зауважити, що результати дослідження отримано для вогнезахисного матеріалу, що має сталі, незалежні від температури значення коефіцієнта теплопровідності, а також певну величину питомої теплоємності  $c_p = 1000$  Дж/(кг·°C) і густини  $\rho_p = 500$  кг/м<sup>3</sup>. Насправді, значення коефіцієнта теплопровідності пасивних і реактивних вогнезахисних матеріалів залежать від низки параметрів,

зокрема від температури, а їх густина змінюється в широкому діапазоні [18–19]. Крім того, результати дослідження отримано тільки для одношарової системи вогнезахисту. Зазначене може призвести до наявності відмінностей в отриманих результатах стосовно проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій для умов вогневого впливу за іншими номінальними температурними режимами, ніж стандартний.

Така невизначеність накладає певні обмеження на використання отриманих результатів, що може трактуватися як недоліки зазначеного дослідження. Неможливість зняти вказані обмеження в межах цього дослідження породжує потенційно цікавий напрям подальших досліджень. Вони, зокрема, можуть бути орієнтовані на виявлення впливу номінальних температурних режимів пожежі на проміжок часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій, оснащених одно- і багатшаровими системами вогнезахисту, в яких застосовують вогнезахисні матеріали зі змінним коефіцієнтом теплопровідності і різною густиною. Таке виявлення дасть змогу оцінити оптимальні параметри різних систем вогнезахисту для сталевих конструкцій, прийнятні для забезпечення їхньої вогнестійкості в широкому діапазоні проміжку часу вогневого впливу за різними номінальними температурними режимами.

**Висновки та напрями подальших досліджень.** Проведеним дослідженням для умов вогневого впливу за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожежі визначено дані щодо проміжку часу збереженості вогнестійкості таких сталевих конструкцій, як балки і колони з одношаровою системою вогнезахисту за такими параметрами цих конструкцій, за якими в роботі [15] оцінено необхідну мінімальну товщину вогнезахисту цієї системи за стандартного температурного режиму, і дані щодо різниці у значеннях такого проміжку часу, отриманих для цих номінальних температурних режимів

пожежі.

Встановлено, що для діапазону параметрів сталеві конструкції, що оцінено, проміжок часу збереженості вогнестійкості сталеві конструкції для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі змінюється в діапазоні від 12,5 хв до 219,0 хв, який є вужчим, ніж діапазон для стандартного температурного режиму, що становить від 30 хв до 240 хв. Для температурного режиму зовнішньої пожежі цей діапазон складає від 33,3 хв до 500,1 хв, і він ширший, ніж для стандартного температурного режиму.

Визначено, що різниця  $\delta_{t,HC}$  між значенням проміжку часу збереженості вогнестійкості сталеві конструкції  $t_{fr,HC}$ , отриманим для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі, і значенням такого ж проміжку часу  $t_{fr}$  за стандартного температурного режиму змінюється в діапазоні від  $-8,8\%$  до  $-58,3\%$ , а така ж різниця  $\delta_{t,ef}$  для температурного режиму зовнішньої пожежі – в діапазоні від  $11,0\%$  до  $108,4\%$ .

З'ясовано, що на величину цієї різниці як для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі, так і для умов вогневого впливу за температурного режиму зовнішньої пожежі, значно впливає значення проміжку часу збереженості вогнестійкості  $t_{fr}$  за стандартного температурного режиму, щодо якого цю різницю визначають. Закономірним є те, що з підвищенням проміжку часу  $t_{fr}$  для температурного режиму вуглеводневої пожежі різниця  $\delta_{t,HC}$  зменшується (за модулем), а для температурного режиму зовнішньої пожежі різниця  $\delta_{t,ef}$  збільшується. Для цих номінальних температурних режимів з підвищенням коефіцієнта поперечного перерізу  $A_p/V$  і зі зменшенням критичної температури сталі  $\theta_{cr}$  різниця зменшується. З підвищенням проміжку часу  $t_{fr}$  для температурного режиму вуглеводневої пожежі вплив  $A_p/V$  і  $\theta_{cr}$  на різницю  $\delta_{a,HC}$  зменшується. Для цього ж режиму пожежі вплив коефіцієнта теплопровідності застосовного вогнезахисного матеріалу  $\lambda_p$



на різницю  $\delta_{t,HC}$  спостерігається тільки для проміжку часу  $t_{fr} = 240$  хв, за якого підвищення  $\lambda_p$  призводить до незначного збільшення  $\delta_{t,HC}$ . Для температурного режиму зовнішньої пожежі з підвищенням  $\lambda_p$  різниця  $\delta_{d,ef}$  зменшується, а з підвищенням проміжку часу  $t_{fr}$  цей вплив збільшується.

Визначено напрями подальших

досліджень, які орієнтовані на виявлення впливу номінальних температурних режимів пожежі на проміжок часу збереженості вогнестійкості для сталевих конструкцій з одно- і багат шаровими системами вогнезахисту, в яких застосовують вогнезахисні матеріали зі змінним коефіцієнтом теплопровідності та різною густиною.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В 1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. [Чинний від 2017-06-01]. Київ : Міністерство України, 2017. 35 с.
2. EN 1363-1:2020. Fire resistance tests – Part 1 : General Requirements. European committee for standardization. Management Centre : Rue de la Science 23, B-1040 Brussels. 2020 CEN. 54 p.
3. 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.
4. 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.
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 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.
7. ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016. Проектування сталевих конструкцій. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість. [Чинний від 2017-04-01]. Київ : Міністерство України, 2016. 111 с.
8. EN 1363-2:1999. Fire resistance tests – Part 2: Alternative and additional procedures. European committee for standardization. Central Secretariat : rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 1999 CEN. 16 p.
9. Новак С., Добростан О., Пустовий М. Вплив температурного режиму пожежі на необхідну мінімальну товщину вогнезахисних покриттів для сталевих конструкцій. *Науковий вісник : Цивільний захист та пожежна безпека*. 2022. № 2(14). С. 5–20.
10. EN 1365-3:1999. Fire resistance tests for loadbearing elements – Part 3 : Beams. European committee for standardization. Central Secretariat : rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 1999 CEN. 14 p.
11. EN 1365-4:1999. Fire resistance tests for loadbearing elements – Part 4 : Columns. European committee for standardization. Central Secretariat : rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 1999 CEN. 11 p.
12. Калафат К., Вахитова Л. *Аналитический обзор средств огнезащиты стальных конструкций 2019–2020* : публикация. Украинский центр стального производства. 2020. 200 с.
13. Калафат К., Вахитова Л. *Аналитический обзор средств огнезащиты стальных конструкций 2021–2022*. Украинский центр стального производства, 2022. 230 с.
14. Новак С., Круковський П., Перепелиця М. Визначення розподілу температури у сталевих конструкціях в умовах вогневого впливу розрахунковими методами. *Науковий вісник : Цивільний захист та пожежна безпека*. 2016. № 1(1). С. 9–15.
15. Новак С., Дрідж 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.
16. Голованов В., Крючков Г. Оценка огнестойкости стальных конструкций при нормируемых температурных режимах пожара. *Пожары и чрезвычайные ситуации : предотвращение и ликвидация*. 2021. № 3. С. 52–60.
17. Ковальов А., Зобенко Н. 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.
18. Круковский П., Новак С., Поклонский В., Еременко С., Фролов Г. *Оценка огнестойкости металлических строительных конструкций и огнезащитной способности покрытий (расчетно-экспериментальный подход)* : коллективная монография. Киев : ТОВ «Франко Пак», 2021. 148 с.
19. 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:10.1016/j.firesaf.2021.103361.

### 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 June 2017. Kyiv: Minrehion Ukraine [in Ukrainian].
2. Fire resistance tests – Part 1: General Requirements. EN 1363-1:2020. European committee for standardization. Management Centre: Rue de la Science 23, B-1040 Brussels. 2020 CEN [in English].
3. Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members – Part 4: Applied passive protection to steel members. EN 13381-4:2013. European committee for standardization. Management Centre: Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2013 CEN [in English].

4. Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members – Part 8: Applied reactive protection to steel members. EN 13381-8:2013. European committee for standardization. Management Centre: Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2013 CEN [in English].
5. Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire. EN 1991-1-2:2002/AC:2013. European committee for standardization. Central secretariat: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2004 CEN [in English].
6. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design. EN 1993-1-2:2005. European committee for standardization. Central Secretariat: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2005 CEN [in English].
7. Proektuvannia stalevykh konstrukttsii. Rozrakhunok konstrukttsii na vohnestiiikist [Design of steel structures. Calculation of structures for fire resistance.]. (2016). DSTU-N B V.2.6-211:2016 from 1 April 2017. Kyiv: Minrehion Ukrainy [in Ukrainian].
8. Fire resistance tests – Part 2: Alternative and additional procedures. EN 1363-2:1999. European committee for standardization. Central Secretariat: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 1999 CEN [in English].
9. Novak, S., Dobrostan, O., Pustovyi, M. (2022). Vplyv temperaturnoho rezhymu pozhezhi na neobkhidnu minimalnu tovshchynu vohnezakhysnykh pokryttiv dlia stalevykh konstrukttsii. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, 2(14), 5–20. [in Ukrainian].
10. Fire resistance tests for loadbearing elements – Part 3: Beams. EN 1365-3:1999. European committee for standardization. Central Secretariat: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 1999 CEN [in English].
11. Fire resistance tests for loadbearing elements – Part 4: Columns. EN 1365-4:1999. European committee for standardization. Central Secretariat: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 1999 CEN [in English].
12. Kalafat, K., Vakhitova, L. (2020). Analiticheskij obzor sredstv ogneshhity stal'ny'kh konstrukcij 2019–2020 [Analytical review of means of fire protection of steel structures 2019-2020]. *Ukrainskij centr stal'nogo proizvodstva* [in Russian].
13. Kalafat K., Vakhitova, L. (2022). Analiticheskij obzor sredstv ogneshhity stal'ny'kh konstrukcij 2021–2022 [Analytical review of the means of fire protection of steel structures 2021–2022.]. *Ukrainskij centr stal'nogo proizvodstva* [in Russian].
14. Novak, S., Krukovskij, P., Perepelytsia, M. (2016). Vyznachennia rozpodilu temperatury u stalevykh konstrukttsiakh v umovakh vohnevoho vplyvu rozrakhunkovymy metodamy [Determination of temperature distribution in steel structures under fire conditions by calculation methods.]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, 1 (1), 9–15. [in Ukrainian].
15. 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].
16. Golovanov, V., Kryuchkov, G. (2021). Otsenka ognestoikosti stalnykh konstrukttsii pri normiruemykh temperaturnykh rezhimakh pozhara [Evaluation of fire resistance of steel structures under normalized temperature conditions of fire]. *Pozhari i chrezvichainie situatsii: predotvrashchenie i likvidatsiya*, 3, 52–60. [in Russian].
17. Kovalov, A., Zobenko, N. (2016). Metodyka poperednoi otsinky vohnezakhysnoi zdatnosti pokryttiv dlia stalevykh konstrukttsii v umovakh temperaturnoho rezhymu vuhlevodnoyi pozhezhi [Methodology for the forward assessment of the fireproof building of coatings for steel structures in the minds of the temperature regime in carbohydrate fire]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, 1(1), 59–65. [in Ukrainian].
18. Krukovskij, P., Novak, S., Poklonskij, V., Eremenko, S., Frolov, G. (2021). Otsenka ognestojkosti metallicheskich stroitel'ny'kh konstrukcij i ogneshhitnoj sposobnosti pokry'tij (raschetno-e'ksperimental'ny'j podkhod) [Evaluation of the fire resistance of metal building structures and the fire retardant ability of coatings (computational and experimental approach)]. Kiev: Izdatel'stvo TOV «Franko Pak» [in Russian].
19. 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:10.1016/j.firesaf.2021.103361 [in English].

## THE INFLUENCE OF THE TEMPERATURE-TIME CURVE ON THE TIME PERIOD OF PRESERVATION OF FIRE RESISTANCE OF STEEL STRUCTURES

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 Chernobyl of the National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine*

---

### KEYWORDS    ANNOTATION

fire protection,  
thermal  
conductivity,  
critical  
temperature of  
steel,  
temperature-  
time curve,  
time period of  
preservation of  
fire resistance,  
steel  
structures,  
thermophysical  
properties

This study is devoted to the evaluation of the relationship between the values of the time period of preservation of fire resistance of protected steel structures, obtained for the conditions of fire exposure according to the temperature-time curve of hydrocarbon and external fire, and the values of this time interval for the standard temperature-time curve. It aimed to identify the effect of nominal temperature-time curves on the time period of preservation of fire resistance of such steel structures as beams and columns with a single-layer fire protection system, for a wide range of parameters of these structures. The calculation method, which is based on the solution of the direct one-dimensional problem of thermal conductivity, determined the data on the time period of preservation of fire resistance of such steel structures for the temperature-time curve of hydrocarbon and external fires and the data on the difference between these obtained values and the values of the same time period for the standard temperature-time curve. It was established that for the range of parameters of the steel structure that was evaluated, the time period of preservation of the fire resistance of the steel structure for the conditions of fire exposure under the temperature-time curve of a hydrocarbon fire varies in the range from 12.5 min to 219.0 min, which is narrower than the range for the standard temperature-time curve, which is from 30 min to 240 min. For the external fire temperature-time curve, this range is from 33.3 min to 500.1 min and is wider than for the standard temperature-time curve. It was determined that the difference between the values of the time period of preservation of fire resistance of a steel structure, obtained for the conditions of fire exposure under the temperature-time curve of a hydrocarbon fire, and the values of the same period of time under the standard temperature-time curve, varies in the range from -8.8% to -58.3%, and the same difference for the temperature-time curve of an external fire varies in the range from 11.0 % to 108.4 %. It was found that the value of this difference is significantly influenced by the value of the time period of preservation of fire resistance under the standard temperature-time curve, relative to which this difference is determined. It is natural that as this time period increases, this difference for the temperature-time curve of a hydrocarbon fire decreases (by modulus), and for the temperature-time curve of an external fire it increases. The influence of the coefficient of thermal conductivity of the applicable fire protection material, the coefficient of the cross-section and the critical temperature of the steel on the value of this difference was also established.

УДК 614.843

## ВПЛИВ НАХИЛУ ФАСАДУ НА ПРОЦЕСИ ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ ЗОВНІШНІМИ ОГОРОДЖУВАЛЬНИМИ КОНСТРУКЦІЯМИ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1.32-40>

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: 04.04.2023

Пройшла рецензування: 12.04.2023

### КЛЮЧОВІ СЛОВА:

оцінювання поширення пожежі фасадами, нахил фасаду, установка з оцінки поширення фасадних пожеж, дослідження фасадних пожеж, пожежна безпека.

### АНОТАЦІЯ

На основі результатів експериментальних досліджень з оцінювання поширення пожежі зовнішніми вертикальними конструкціями будівель визначено характер змін температурних розподілів на поверхні досліджуваного фрагмента фасаду залежно від значення його нахилу. Здійснено аналіз проблемних аспектів під час проведення оцінювання поширення пожежі зовнішніми огороджувальними конструкціями складної форми та обґрунтовано актуальність проведених експериментальних натурних досліджень. Наведено етапи організації експерименту, підготовки випробувальної установки та обладнання виміральної техніки під час проведення імітаційних випробувань на базі пожежно-випробувального полігону. Описано характер поширення полум'я досліджуваним фрагментом фасадної системи для кожного етапу досліджень. На основі отриманих даних щодо температурного режиму на поверхні досліджуваного фрагмента фасаду побудовано графіки температурних залежностей в часі щодо кожного етапу експериментальних досліджень, а також відповідні поліноміальні регресійні залежності. Здійснено аналіз можливості поширення пожежі зовнішніми вертикальними огороджувальними конструкціями на вище розташовані поверхи на основі міжнародних критеріїв та особливостей конструктивного виконання фасадних систем. Порівняння отриманих закономірностей дало змогу зробити висновки щодо впливу нахилу фасаду під різними кутами на процеси поширення пожежі зовнішніми огороджувальними конструкціями, а також визначити подальші напрями досліджень щодо забезпечення якісного оцінювання процесів поширення пожежі фасадами будівель. Отримані результати можуть бути передумовою для зміни підходів щодо оцінювання процесів поширення пожежі зовнішніми вертикальними огороджувальними конструкціями, в яких на сьогодні не враховуються такі конструктивні характеристики фасадів, як кути їх можливого нахилу.

### Постановка

Дослідження методів оцінювання поширення пожежі зовнішніми огороджувальними конструкціями (фасадами) будівель та споруд показало, що у методиках і випробувальних стендах не передбачається брати до уваги можливі нахили у фрагментах фасаду та взагалі не враховується можливість виконання всієї фасадної системи під кутом відносно вертикальної площини [1–2]. З огляду на

### проблеми.

проведений аналіз найбільш поширених типів нахилених фасадів у Європі, США, Азії та, зокрема, в Україні кути нахилу чи схилю площини фасадів будівель зазвичай становлять до 15° відносно вертикалі. Таким чином, на сьогодні під час проведення випробувань та досліджень щодо пожежної небезпеки матеріалів фасадних систем і здійснення оцінки можливого поширення пожежі фасадами будівель немає можливості враховувати

таку конструктивну характеристику, як нахил.

Через брак підходів щодо врахування кутів нахилу фасаду під час проведення оцінки поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями створюються передумови відсутності комплексного та якісного оцінювання їх реальних конструктивних параметрів. Слід розуміти, що результати оцінювання пожежної небезпеки кожного окремого параметра фасадної системи (оздоблювальних матеріалів, конструктивних параметрів, наявність суміжно розташованих площин тощо) та результати проведення комплексного оцінювання можуть значно відрізнятись, а інколи взагалі суперечать один одному.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У дослідженні [3] розкрито особливості оцінювання поширення пожежі похилими поверхнями, зокрема покрівлями, обґрунтовано зміну швидкості поширення пожежі поверхнею залежно від кута нахилу даху. Серія випробувань показала, що на абсолютно горизонтальній поверхні швидкість поширення пожежі на 35–40% менша, ніж для поверхні, яка перебуває під нахилом у  $30^\circ$ . Ці дослідження стали основою для обґрунтування параметрів методу випробувань покрівельних матеріалів за показниками пожежної небезпеки та покрівель загалом. На рис. 1 наведено схеми поширення полум'я досліджуваною поверхнею конструкції покрівлі залежно від значення ухилу площини згідно з дослідженнями [3]. Робота [4] присвячена дослідженню впливу нахилу фасаду на процеси поширення пожежі за допомогою проведення математичного моделювання, проте такі дані не містять верифікацію отриманих залежностей, зокрема через проведення натурних вогневих випробувань.

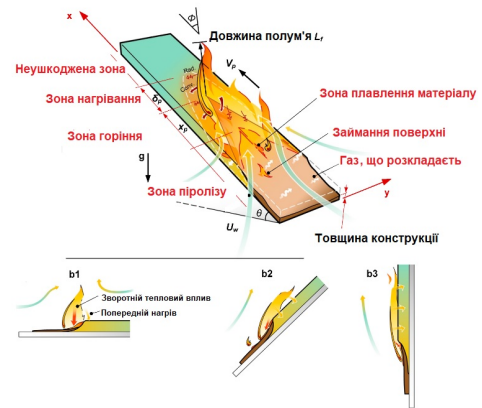


Рисунок 1 – Схема поширення пожежі нахиленою поверхнею конструкції

Окрім цього, в роботі [4] залишаються дискусійними питання обґрунтування параметрів пожежного навантаження всередині приміщення, де моделюється пожежа, створення температурного режиму пожежі, доведення тривалості проведення моделювання, а також конструктивних параметрів світлових прорізів, через які поширюється пожежа. На рис. 2 наведено візуалізацію FDS моделі, на основі якої проводилися дослідження впливу нахилу фасаду на процеси поширення пожежі. У роботі [5] розкриваються проблеми оцінювання стійкості збірних систем фасадної теплоізоляції до поширення вогню, а також аспекти оцінювання пожежної небезпеки матеріалів, які використовуються у фасадних системах, проте не враховуються питання оцінювання конструктивних параметрів фасадних систем на процеси поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями на вище розташовані поверхні.

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

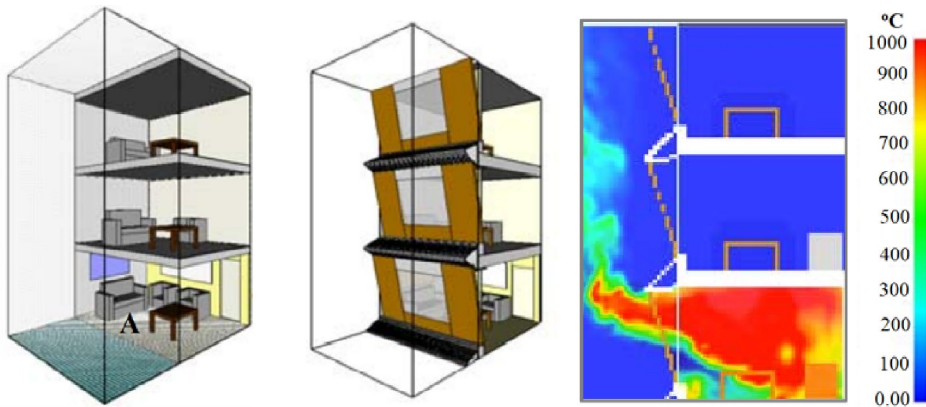


Рисунок 2 – Моделювання поширення пожежі нахиленим фрагментом фасаду за [4]

**Формулювання цілей дослідження.** Мета роботи полягає у визначенні впливу нахилу площини фрагмента фасадної системи на процеси поширення пожежі її конструкцією як передумови можливості комплексного оцінювання пожежної небезпеки фасадної системи.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- обґрунтувати конструктивні характеристики відтворюваного фрагмента фасадної системи, які передбачається дослідити;

- на основі розробленої методики експериментальних досліджень з оцінки обмеження впливу пожежі від джерела теплового випромінювання на фасадні системи забезпечити науково-методичний супровід з організації імітаційних досліджень для визначення впливу нахилу фасаду на процеси поширення пожежі зовнішньою огорожувальною конструкцією;

- здійснити обчислення дисперсії відхилень за середнім значенням відповідних термопар із метою перевірки збіжності кожної серії експериментів для певного кута нахилу фрагмента досліджуваної фасадної системи;

- на основі отриманих даних зробити висновки щодо впливу нахилу фасаду на процеси поширення пожежі зовнішньою огорожувальною конструкцією вказаного типу.

**Методи дослідження.** В роботі було використано методи узагальнення раніше виконаних досліджень щодо

обґрунтування вимог до випробувальної установки з оцінки поширення пожежі фасадами будівель, методи пошукового натурного експерименту. Також використано методи полігонних вогневих випробувань (за чинними методиками) для дослідження процесів теплообміну між джерелом пожежі та об'єктами, які піддаються впливу.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** З огляду на аналіз методик з оцінки обмеження поширення пожежі та прогнозування характеру її поширення фасадами будівель [6–7] показано основні конструктивні характеристики, які має забезпечити удосконалена експериментальна установка для виявлення закономірностей зміни температур на зовнішній поверхні вертикальних будівельних конструкцій. Визначено, що найбільш поширені кути нахилу чи схилу площини фасадів будівель зазвичай становлять близько  $15^\circ$  відносно вертикалі, проте є окремі випадки, коли фасад може розташовуватися під кутом до  $20^\circ$  відносно вертикалі. За результатом фізичного створення установки для виявлення закономірностей зміни температур на зовнішній поверхні вертикальних будівельних конструкцій досягнуто необхідних характеристик, що вказані вище, для забезпечення можливості розміщення площини під визначеними нахилами. На рис. 3 наведено фото установки із розміщенням досліджуваного фрагмента фасадної системи під кутом  $-20^\circ$ ,  $0^\circ$  та  $+20^\circ$  відносно вертикалі.





а)



б)



в)

Рисунок 3 – Зовнішній вигляд установки, де а) – встановлення досліджуваного фрагмента фасаду під кутом  $-20^\circ$  відносно вертикалі; б) – встановлення досліджуваного фрагмента фасаду під кутом  $0^\circ$  відносно вертикалі; в) – встановлення досліджуваного фрагмента фасаду під кутом  $+20^\circ$  відносно вертикалі

Джерело: розробка автора

Суть методу випробувань полягає у впливі на досліджуваний фрагмент фасадної системи пожежі, яка відтворюється всередині вогневої камери протягом 30 хв. Температурний режим всередині вогневої камери має відповідати стандартному температурному режиму згідно з [8] або може бути більшим. Окремою умовою випробувань є те, що середній температурний режим у вогневій камері має бути не менше  $600^\circ\text{C}$  упродовж 20 хв із загальних 30 хв випробувань, що контролюється окремою термопарою.

Для контролю температури на поверхні випробувального фрагмента фасаду розміщено термопари з огляду на розрахунок 1 термопари на  $50\text{ cm}^2$  площі фасадної системи. Розміщені термопари в конструкції фрагмента фасаду дають змогу отримати дані щодо температурних розподілів на поверхні фасаду та відповідно забезпечують можливість оцінювання характеру поширення пожежі фасадом. Термопари підключаються до вимірювально-обчислювальної системи «Термоконт» відповідно до схеми, наведеної на рис. 4.

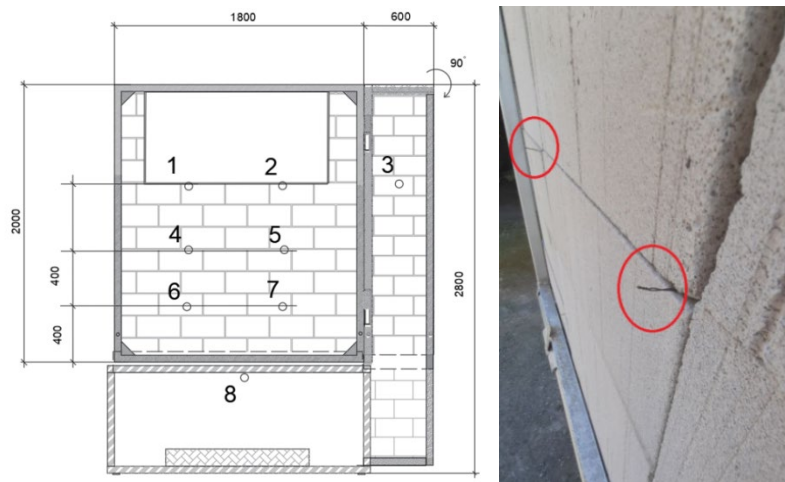


Рисунок 4 – Схема розміщення термопар на досліджуваному фрагменті фасаду, де цифри (1–8) є порядковим номером для кожної термопари, а також наведено фото їх зовнішнього вигляду

Джерело: розробка автора


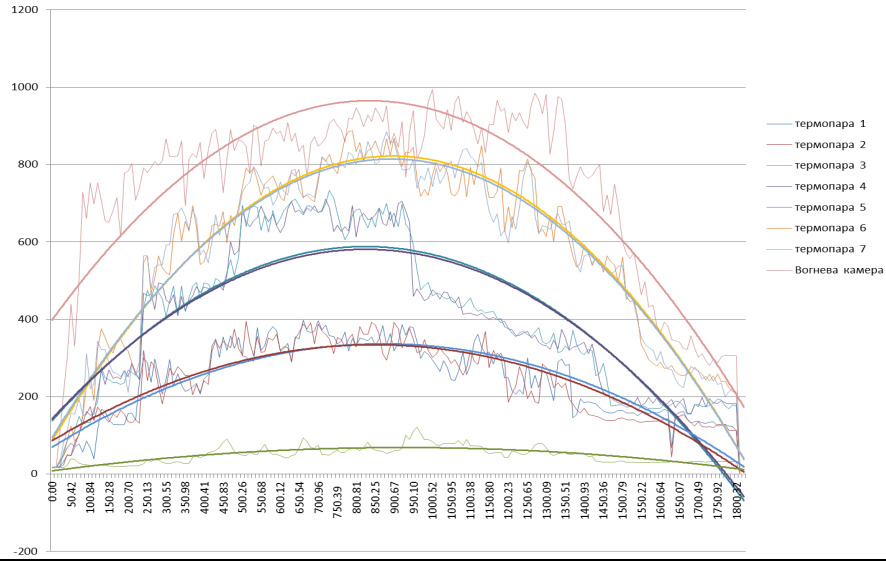
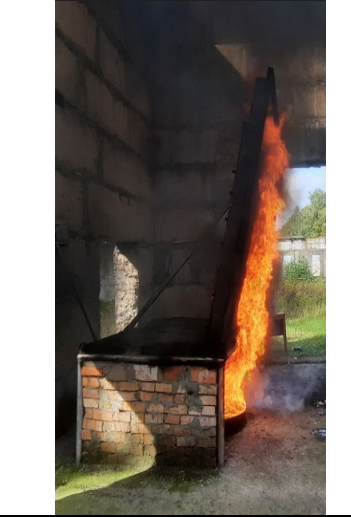
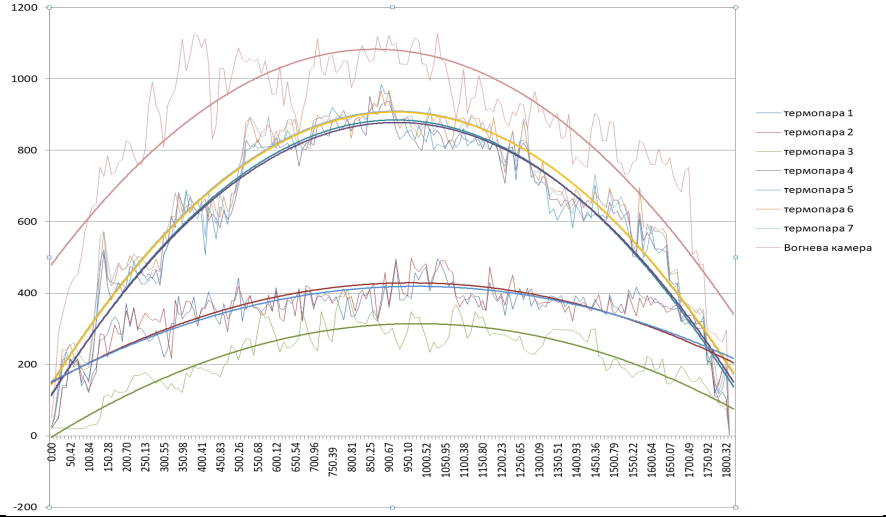

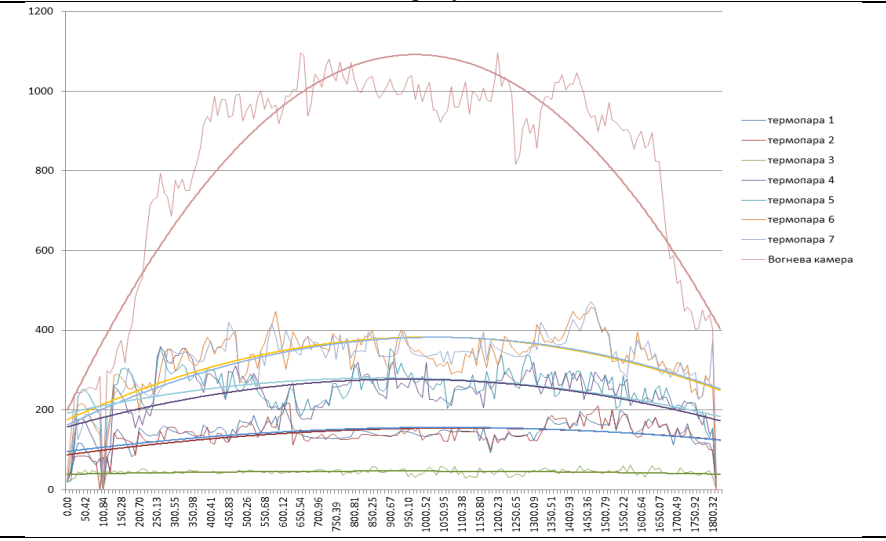
Як модельне вогнище пожежі згідно із методикою досліджень використовувалося модельне вогнище класу 34В, яке наповнювалося мастилом типу Castrol Optigear Synthetic X320/X320 WTO у кількості 60 л ( $\pm 200$  мл). Наявність такого об'єму рідкого палива забезпечувало тривалість його горіння не менше 1800 с. Дослідження передбачало проведення трьох вогневих випробувань тривалістю 30 хв кожне, під час яких зафіксовано отримані температурні залежності для кожного із досліджуваних нахилів фрагмента фасадної системи, а саме – під кутом  $-20^\circ$ ,  $0^\circ$  та  $+20^\circ$  відносно вертикалі. За результат визначення показника основної температурної кривої беруть середнє арифметичне трьох результатів випробувань.

Під час проведення експериментального дослідження спостерігалось монотонне зростання температури на поверхні дослідних зразків фасадної системи, розміщених під досліджуваними нахилами, що можна прирівняти до експоненційного розподілу. Фрагмент фасадної системи обвуглювався, але займання матеріалів або втрати їх цілісності не відбувалося. Повне вигорання пожежної навантаги у деку спостерігалось на 30–31 хв експериментальних досліджень. В табл. 1 наведено графіки температурних режимів на поверхні фрагментів фасадів та відповідні фото натурних досліджень із визначенням впливу нахилу фасаду на процеси поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями. На основі регресійного аналізу даних для кожного із досліджуваних варіантів нахилу фасаду та отримання функціональної залежності між двома величинами, а саме, температурою і часом, побудовано поліноміальні регресійні залежності. Аналіз отриманих даних дає змогу зробити попередній висновок, що зміна нахилу кута досліджуваного фрагмента фасадної системи значно впливає на характер температурних розподілів на поверхні фасаду.

Наприклад, для термопар Т1–Т3, які розташовуються на рівні віконного прорізу у фрагменті фасаду, розміщеного під кутом  $0^\circ$  відносно вертикалі (тобто абсолютно вертикально), значення температури за поліноміальними кривими в момент пікових значень температурного режиму у вогневій камері (з 500 по 1500 с) становить близько  $240\text{--}280^\circ\text{C}$ . Водночас для тих самих термопар, які розташовуються у фрагменті фасаду, розміщеного під кутом  $+20^\circ$  відносно вертикалі, значення температури за поліноміальними кривими в момент пікових значень температурного режиму у вогневій камері складають  $370\text{--}430^\circ\text{C}$ . Для фрагмента фасаду, розміщеного під кутом  $-20^\circ$  відносно вертикалі, значення температури для термопар Т1–Т3 за поліноміальними кривими в момент пікових значень температурного режиму у вогневій камері складають  $160\text{--}180^\circ\text{C}$ . Слід відзначити, що група термопар Т1–Т3, які розташовуються на рівні віконного прорізу у фрагменті фасаду, розміщується на відстані 1400 мм від верхнього краю вогневої камери, що відповідає фактично максимальній відстані міжповерхового простінку між віконними прорізами, які розташовані один над одним згідно із державними будівельними нормами [9–10]. Враховуючи, що відповідно до норм [11–12] критична температура руйнування склопрозорих конструкцій та звичайних (невогнестійких) вікон становить  $260^\circ\text{C}$ , то для цього випадку натурних експериментальних досліджень можна стверджувати таке. Для вертикально розташованого фасаду та фасаду нахиленого під кутом  $+20^\circ$  відносно вертикалі створюються умови, за яких виникає висока ймовірність руйнування віконних конструкцій та, як наслідок, поширення пожежі усередині приміщення вище розташованого поверху. Також здійснено аналіз даних у разі мінімальної відстані міжповерхового простінку між віконними прорізами, які розташовані один над одним (400 мм), що характерно для фасадів із панорамними вікнами.



Таблиця 1 – Результати експериментальних досліджень

	
<p><b>Прямий кут</b></p>	<p>Середні значення температури по термопарам (1–8) за результатом 3 випробувань</p>
	
<p><b>Кут +20° відносно вертикалі</b></p>	<p>Середні значення температури по термопарам (1–8) за результатом 3 випробувань</p>
	
<p><b>Кут -20° відносно вертикалі</b></p>	<p>Середні значення температури по термопарам (1–8) за результатом 3 випробувань</p>

Аналіз температурних даних для термопар Т6 та Т7 показав, що значення температури за поліноміальними кривими в момент пікових значень температурного режиму у вогневій камері (з 500 по 1500 с) становить 580–820 °С для фрагмента фасаду, розміщеного під кутом 0° відносно вертикалі. Водночас для тих самих термопар, які розташовуються у фрагменті фасаду, розміщеного під кутом +20° відносно вертикалі, значення температури за поліноміальними кривими в момент пікових значень температурного режиму у вогневій камері складає 630–890 °С. Для фрагмента фасаду, розміщеного під кутом -20° відносно вертикалі, значення температури для термопар Т6 та Т7 за поліноміальними кривими в момент пікових значень температурного режиму у вогневій камері складають 290–380 °С.

Отримані дані дають змогу зробити висновок, що нахил досліджуваного фрагмента фасадної системи за цих умов випробувань може значно впливати на процеси поширення пожежі, а для окремих випадків та типів фасадних систем зміна температури на поверхні фасаду залежно від кута нахилу чи схилу може змінюватися фактично 2,5–2,9 раза.

Окремо слід відзначити, що, окрім нахилу фрагмента фасадної системи, значно впливають на процеси поширення пожежі суміжні площини фасадів, які під певним кутом прилягають до основної площини. Ці процеси також потребують вивчення та надалі можуть змінити уявлення про закономірності поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями, а відповідно й підходи та критерії щодо оцінювання пожежної небезпеки фасадів.

**Висновки та напрями подальших досліджень.** З огляду на аналіз недоліків наявних методик і підходів з оцінювання можливості поширення пожежі зовнішніми

огорожувальними конструкціями, застосовуючи удосконалену методику експериментальних досліджень та відповідну випробувальну установку, проведено дослідження впливу нахилу фасаду на процеси поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями від джерела теплового випромінювання.

Виявлено, що за умов експериментальних досліджень зміна кута нахилу досліджуваного фрагмента фасадної системи значно впливає на характер температурних розподілів на поверхні фасаду. Для термопар, які встановлені на рівні віконного прорізу у фрагменті фасаду і відповідно розташовуються на відстані 1400 мм від верхнього краю вогневої камери, значення температури за поліноміальними кривими в момент пікових значень температурного режиму у вогневій камері (з 500 по 1500 с) для фрагмента фасаду, розміщеного під кутом -20°, 0°, та +20° відносно вертикалі, становлять відповідно 160–180 °С, 240–280 °С та 370–430 °С. У разі мінімальної відстані міжповерхового простінку між віконними прорізами, які розташовані один над одним (400 мм), від верхнього краю вогневої камери, значення температури за поліноміальними кривими в момент аналогічних пікових значень температурного режиму у вогневій камері для фрагмента фасаду, розміщеного під кутом -20°, 0°, та +20° відносно вертикалі, становлять 580–820° С, 630–890° С та 290–380° С відповідно.

Отримані дані можуть бути передумовою для зміни підходів щодо оцінювання процесів поширення пожежі зовнішніми вертикальними огорожувальними конструкціями, які на сьогодні не враховують такі конструктивні характеристики фасадів, а відповідно не забезпечують комплексне та якісне оцінювання процесів поширення пожежі фасадами будівель.

## 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* : матеріали міжнародної науково-практичної конференції, 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*. ЛДУБЖД. № 40, 2022, С. 5–15.
3. Tu, R., Ma, X., & Zeng, Y. Influences of Sub-Atmospheric Pressure on Upward Flame Spread over Flexible Polyurethane Foam Board with Multiple Inclinations. *Advanced Analysis and Technology in Fire Science and Engineering*, 2020. Vol. 10(20). P. 1–10.
4. Performance of modern building façades in fire: a comprehensive review/Kate T. Q. Nguyen et al. *Electronic Journal of Structural Engineering*. 2016. Vol. 16. P. 69–87.
5. Скоробагатко Т., Добростан О., Новак С. Аналіз європейських методів оцінювання стійкості збірних систем фасадної теплоізоляції до поширення вогню *Науковий вісник : Цивільний захист та пожежна безпека*, 2020. Т. 9. № 1. С. 94–106.
6. Балло Я. В., Яковчук Р. С., Кагітін О. І., Стилик І. Г. Аналіз основних методів оцінювання поширення пожежі по фасадам будівель. *Пожежна безпека*. ЛДУБЖД. 2022. № 41. С. 20–30.
7. Балло Я. В. Створення експериментального випробувального стенду в рамках досліджень обмеження поширення пожежі по фасадам будівель. *Науковий вісник : Цивільний захист та пожежна безпека*. 2022. № 2(13). С. 21–34.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. SP Fire 105 External wall assemblies and facade claddings. Reaction to fire. SP Technical Research Institute of Sweden, 1994. 16 p.
12. GB15763.1-2009. Safety glazing materials in building. Part 1 : Fire-resistant glass. Effective from 2001-07-13. Official edition. Republic of China : Former State Building Materials Industry Bureau, 2001. 13 p.

## 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 naukovo-praktychnoi konferentsii*. Kharkiv: Natsionalnyi universytet tsyvilnoho zakhystu Ukrainy s. 6-7. [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, s. 5-15. [in Ukrainian].
3. Tu, R., Ma, X., & Zeng, Y. (2020) Influences of Sub-Atmospheric Pressure on Upward Flame Spread over Flexible Polyurethane Foam Board with Multiple Inclinations. *Advanced Analysis and Technology in Fire Science and Engineering*, , 10(20), s. 1–10. doi:10.3390/app10207117 [in English].
4. Kate T. Q. (2016) Performance of modern building façades in fire: a comprehensive review. Nguyen et al. *Electronic Journal of Structural Engineering*. doi:10.56748/ejse.16212 [in English].
5. Skorobahatko, T., Dobrostan, O., Novak, S. (2020). Analiz yevropeiskykh 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].
6. Ballo Ya. V., Yakovchuk R. S., Kahitin O. I., Stylyk I. H. (2022) Analiz osnovnykh metodiv otsiniuvannya poshyrennia pozhezhi po fasadam budivel. [Analysis of the main methods of assessing the spread of fire on the facades of buildings] *Visnyk «Pozhezhna bezpeka»*. Vol. 41. s. 20–30. [in Ukrainian].
7. Ballo Ya. V. Stvorennia eksperymentalnoho vyprobuvalnoho stendu v ramkakh doslidzhen obmezhenia poshyrennia pozhezhi po fasadam budivel. [Creation of an experimental test stand within the framework of research on limiting the spread of fire on the facades of buildings] *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*. 2022. № 2 (13). s. 21–34. [in Ukrainian].
8. Fire protection. Building structures. Methods of testing for fire resistance. General requirements (1999). DSTU B V.1.1-4-98. K.: Ukrarkhbudynform, 1999. 21s. [in Ukrainian].
9. 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].
10. Konstruktsii budynkiv i sporud. Nastanova shchodo proektuvannya y ulashtuvannya vikon ta dverei (2010). DSTU-N B V.2.6-146:2010. Kyiv : UkrNDNTs, 2011. 106 s. [in Ukrainian].
11. External wall assemblies and facade claddings. Reaction to fire (1994). SP Fire 105. SP Technical Research Institute of Sweden, 16 s. [in English].
12. Safety glazing materials in building - Part 1: Fire-resistant glass. (2001) GB15763.1-2009. Republic of China : Former State Building Materials Industry Bureau, 13 s. [in English].

## INFLUENCE OF THE SLOPE OF THE FACADE ON THE PROCESSES OF FIRE SPREAD THROUGH THE FACADES OF BUILDINGS

Ya. Ballo

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

---

### KEYWORDS

evaluation of the spread of fire on facades, slope of the facade, installation for evaluating the spread of facade fires, research of facade fires, fire safety.

### ANNOTATION

Based on the results of experimental studies on the assessment of the spread of fire on the external vertical structures of buildings, the nature of changes in temperature distributions on the surface of the examined fragment of the facade, depending on the value of its slope, was determined. An analysis of problematic aspects during the evaluation of the spread of fire on external enclosing structures of a complex shape was carried out and the relevance of the conducted experimental field studies was substantiated. The stages of the organization of the experiment, the preparation of the test setup and the equipment of the measuring equipment during the simulation tests on the basis of the fire-testing range are given. The nature of the flame propagation along the investigated fragment of the facade system for each stage of research is described. On the basis of the obtained data on the temperature regime on the surface of the examined fragment of the facade, graphs of temperature dependences over time for each stage of experimental research were constructed, and corresponding polynomial regression dependences were constructed. An analysis of the possibility of fire spreading through external vertical enclosing structures to the floors above was carried out on the basis of international criteria and features of the design of facade systems. The comparison of the obtained regularities made it possible to draw conclusions about the influence of the inclination of the facade at different angles on the processes of fire propagation along external enclosing structures, as well as to determine future directions of research to ensure the qualitative assessment of fire propagation processes along the facades of buildings. The obtained results can be a prerequisite for changing the existing approaches regarding the assessment of fire propagation processes along external vertical enclosing structures, which today do not take into account such constructive characteristics of facades as the angles of their possible inclination.

УДК 351.861 + 614.84

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ДІЯЛЬНОСТІ ГАЗОДИМОЗАХИСНИКІВ РІЗНИХ ВІКОВИХ ГРУП

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1.41-55>

Скоробагатько Т. М.<sup>1\*</sup>, ORCID 0000-0001-5651-1975

Єременко С. А.<sup>1</sup>, ORCID 0000-0003-3685-4713

Пруський А. В.<sup>1</sup>, ORCID 0000-0002-9132-7070

Сидоренко В. Л.<sup>1</sup>, ORCID 0000-0002-4584-486X

Савельєв І. В.<sup>2</sup>, ORCID 0000-0002-8067-8430

Стрілець В. М.<sup>3</sup>, ORCID 0000-0001-5992-1195

\*E-mail: tarasskorobagatko@gmail.com

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

<sup>2</sup>Головне управління ДСНС України у Луганській області, Україна

<sup>3</sup>Національний університет цивільного захисту України, Україна

### ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 09.03.2023

Пройшла рецензування: 15.04.2023

### КЛЮЧОВІ СЛОВА:

газодимозахисник, вік, мобільний тренажер, експериментальні дослідження, статистичний аналіз.

### АНОТАЦІЯ

З огляду на проведений аналіз важливою та невирішеною частиною проблеми підвищення ефективності ліквідації надзвичайних ситуацій, пов'язаних з оперативною діяльністю пожежників-рятувальників у непридатному для дихання середовищі, є брак відомостей щодо того, як вік газодимозахисника впливає на показники, зокрема фізіологічні, які характеризують результати виконання професійно-важливих завдань. Проведено порівняльні експериментальні дослідження результатів діяльності газодимозахисників двох вікових груп в апаратах на стисненому повітрі (АСП) на мобільному тренажері контейнерного типу виробництва компанії MAW GmbH (мобільний тренажер), який найбільш повно відтворює умови роботи рятувальників у непридатному для дихання середовищі, з їх подальшим статистичним аналізом. Статистичний аналіз отриманих даних здійснено з рівнем значущості  $\alpha=0,05$ . Визначено, що для газодимозахисників усіх вікових груп сам процес включення в АСП та очікування роботи в екстремальних умовах є значущим стрес-фактором для особового складу всіх вікових груп. Запропоновано відповідні практичні рекомендації, зокрема: під час проведення газодимозахисниками практичних занять в апаратах на стисненому повітрі особливу увагу варто звертати на пожежників-рятувальників старшої вікової групи, у яких частота серцевих скорочень (ЧСС) починає перевищувати 150 уд./хв, для молодшої вікової групи такого контролю потребує особовий склад, у якого ЧСС починає перевищувати 165 уд./хв; у процесі оперативного контролю та планування діяльності газодимозахисників на посту безпеки доцільно враховувати, що час виконання оперативного завдання в непридатному для дихання середовищі у особового складу старшої вікової групи може бути більшим на 15–20%; на посту безпеки під час попередніх розрахунків часу роботи в АСП для газодимозахисників усіх вікових груп доцільно використовувати показник легеневої вентиляції  $\omega_{л} \approx 80$  л/хв; на посту безпеки доцільно використовувати спрощені розрахунки часу роботи в АСП. Так, у разі роботи в АСП з об'ємом балона 8 л загалом можна використовувати показник швидкості падіння тиску, також на посту безпеки доцільно планувати діяльність ланок ГДЗС таким чином, щоб вони змінювались, якщо є необхідність у довготривалому проведенні аварійно-рятувальних робіт, через 15–20 хвилин.

**Постановка проблеми.** Під час гасіння майже кожної десятої пожежі особовий склад пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС застосовує засоби індивідуального захисту органів дихання (далі – ЗІЗОД), в тому числі кожної третьої – п'ятої пожежі, що виникають в будівлях та спорудах різного функціонального призначення. Так, у 2022 році 7008 пожеж в Україні ліквідували із застосуванням ланок газодимозахисної служби (далі – ГДЗС). Водночас загальна кількість ланок ГДЗС склала 8710 од., а сумарний час їхньої роботи сягає майже 3000 год [1].

Це свідчить про те, що проблема підвищення ефективності ліквідації надзвичайних ситуацій, пов'язаних з оперативною діяльністю пожежників-рятувальників у непридатному для дихання середовищі, без зниження рівня безпеки особового складу, є актуальною.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Підтвердженням актуальності цієї проблеми є постійна увага до роботи пожежників у ЗІЗОД у провідних країнах світу. Водночас виділяють ризики, що зумовлені як віком, статтю та стажем роботи, так і безпосередньо діяльністю в апаратах на стисненому повітрі (далі – АСП) [2], робота в яких практично пов'язана із запасом та витратою повітря. Дослідження щодо витрати повітря, ураховуючи не тільки вік, а й те, чи є рятувальник членом кар'єрної, неповної зайнятості або волонтерської пожежної команди, проводилися в Університеті Східного Кентуккі [3]. Але за результатами було зроблено висновок, що обсяг вибірки був занадто малим. З огляду на це необхідно надалі проводити дослідження, щоб отримати більш глибоке розуміння того, що ж впливає на споживання повітря газодимозахисниками і як цим процесом можна управляти.

Зазначене свідчить про те, що є необхідність у визначенні особливостей оперативної роботи в засобах індивідуального захисту органів дихання газодимозахисників різних вікових груп.

Результати такого дослідження, але без включення пожежників-рятувальників в АСП, наведені в [4], де розглядалась відповідність пожежників визначеним фізичним вимогам. Було вказано, що літні досвідчені пожежники показали себе практично такими, що відповідають певним критеріям молодших за віком. Водночас аеробний тест був більш значущим, ніж тест на силу. Проте в цьому дослідженні не розглядалися питання, пов'язані з роботою в АСП. Крім цього, використовувалися стандартні фізіологічні тести, які з оперативно-рятувальною діяльністю газодимозахисників пов'язані опосередковано.

Хоча в [5] зазначено, що навіть помірні фізичні навантаження під час ходьби пожежника у поєднанні з пошуково-рятувальними роботами у разі носіння повного захисного спорядження та дихання через АСП створюють значне фізіологічне навантаження на професійних пожежників. Швидкість споживання повітря під час виконання завдань в метрополітені призводить до того, що запас повітря закінчується значно раніше часу захисної дії АСП, наведеного в його тактико-технічних характеристиках. Це ж наводиться і в [6], де визначено, що заміна АСП на регенеративні дихальні апарати (далі – РДА) усуває подавання повітря як фактор, який обмежує його застосування в метрополітені. Аналогічний висновок зроблено в [7–8], де поряд із цим підкреслено, що в РДА виникає проблема управління термічним навантаженням частотою серцевих скорочень (ЧСС). Про це наголошено і в [9], де вказано, що носіння дихального апарата зумовлює терморегуляторний, метаболічний та психологічний стрес, який не пояснюється насамперед вагою дихального апарата, і наголошено на цінності ергономічного дизайну та фізіологічного моніторингу. А в [10] зроблено висновок, що уникнути надмірної напруги під час ефективного гасіння пожежі тривалістю 20–30 хв із дихальним апаратом можна лише у разі хорошої фізичної працездатності та самоконтролю фізичного навантаження.

Водночас [11] відносна інтенсивність самостійного вибору роботи пожежниками мінлива і має розглядатися як додаткова фізіологічна детермінанта робочої поведінки. Але саме такий вибір є характерним якраз для досвідчених рятувальників. З іншого боку, використання газодимозахисниками різних модифікацій АСП призвело до невеликих фізіологічних відмінностей [12], проте 37% рятувальників, які мали гіршу фізичну форму та більшу масу тіла (а це є характерним саме для більш вікового особового складу), ніж інші, не змогли виконати другий за часом варіант робочого циклу пожежогасіння, як заведено у США, насамперед через перевищення граничних меж частоти серцевих скорочень. Продуктивність діяльності значно знизилась внаслідок тривалого навантаження (під час другого циклу).

Тобто в [5–12] фізичні навантаження газодимозахисників не співвідносяться з віком та досвідом конкретного рятувальника. Видно, що всі ці дослідження не були пов'язані з порівнянням фізіологічних та інших показників діяльності залежно від особливостей особового складу різних контрольних груп.

Це було зроблено у [13], де показано, що гасіння пожеж у висотних будівлях призводить до значної перенапруги роботи серця і пошуково-рятувальні бригади (розрахунки) та бригади (розрахунки) матеріальної підтримки зазнають більшої серцевої напруги, ніж бригади (розрахунки) пожежогасіння, насамперед через відмінності в тривалості роботи. І в цьому разі на вік не звертали уваги. Як не звертали і в [14], де порівняли витрати повітря в АСП у пожежників-чоловіків і цивільних чоловіків під час носіння автономного дихального апарата та визначили, що респіраторні реакції збільшились в обох групах, а дихальний об'єм виріс тільки у звичайних чоловіків (на 20%). І саме збільшення частоти дихання призводить до зменшення задишки у чоловіків-пожежників під час

напруженої оперативної діяльності з використанням АСП.

Таким чином, невирішеною частиною проблеми підвищення ефективності ліквідації надзвичайних ситуацій, пов'язаних з оперативною діяльністю пожежників-рятувальників у непридатному для дихання середовищі, без зниження рівня безпеки, є відсутність відомостей щодо того, як вік газодимозахисника впливає на показники, які характеризують результати, зокрема фізіологічні, виконання професійно важливих завдань.

**Формулювання цілей дослідження.** Метою статті є аналіз того, як вік газодимозахисника впливає на показники, які характеризують результати його діяльності.

Для досягнення поставленої мети потребують розв'язання такі завдання:

- вибрати лабораторно-випробувальну базу та визначити показники, які характеризують діяльність газодимозахисників;
- оцінити можливість отримання вихідних даних;
- провести статистичний порівняльний аналіз отриманих експериментальних результатів;
- обговорити результати порівняльного аналізу того, як вік газодимозахисника впливає на показники, які характеризують результати його діяльності.

**Методи дослідження.** Застосовано експериментальні дослідження результатів діяльності газодимозахисників у АСП на мобільному тренажері контейнерного типу виробництва компанії MAW GmbH (далі – мобільний тренажер), який на сьогодні найбільш повно відтворює умови роботи рятувальників у непридатному для дихання середовищі, з їх подальшим статистичним аналізом.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

*Вибір лабораторно-випробувальної бази та оцінка можливості отримання вихідних даних.* Для проведення порівняльних експериментальних



випробувань використовувався [15] мобільний тренажер виробництва компанії MAW GmbH, який складався з: мобільного тренувального комплексу з пультом управління (рис. 1), що розміщується в 20-ти футовому (66 м) металевому контейнері, який поділено на три зони: компресорна, пульт керування, приміщення з тренажерами. Комплекс призначений для відтворення фізичних навантажень на газодимозахисників під час розгортання сил і засобів, залучених до ліквідації надзвичайних ситуацій; мобільної теплодимокамери-лабіринта (рис. 2), яка являє собою 40-ка футовий (12 м) металевий контейнер, в якому розміщено двоярусний лабіринт. Цей контейнер оснащено елементами, які відтворюють елементи оперативної діяльності газодимозахисників та ускладнюють проходження лабіринту шляхом подолання труби-лаза, різноманітних проходів, дверей, жалюзі, відкидних заслонок, похилих поверхонь, роликів конвеєра тощо.

Задимлення контейнера забезпечується димомашиною, а підвищена температура навколишнього середовища (до 60 °С) – електричними тенами. Комплекс призначений для відтворення умов роботи газодимозахисників у задимленому середовищі та обмеженому просторі під час проведення розвідки, порятунку постраждалих та гасіння пожеж.

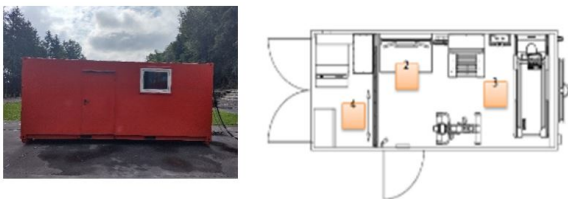


Рисунок 1 – Мобільний тренувальний комплекс із пультом управління

Джерело: [15]

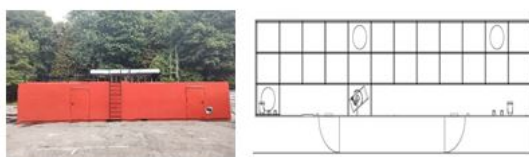


Рисунок 2 – Мобільна теплодимокамера-лабіринт

Джерело: [15]

Цей мобільний тренажер протягом серпня – листопада 2022 року був задіяний для проведення практичних занять із газодимозахисниками територіальних підрозділів ДСНС усіх вікових груп. Відповідно до [15] під час занять із газодимозахисниками, а саме вони і були досліджуваними, кожен із них у закріпленому за ним АСП виконує у випадковій послідовності такі визначені вправи з урахуванням мінімально необхідного навантаження: підіймання нескінченними сходами (15 кДж); тяговий тренажер (5 кДж); бігова доріжка (10 кДж); велотренажер (30 кДж) (рис. 3); подолання теплодимокамери-лабіринту в задимленому середовищі (рис. 4) в умовах підвищеної температури (до 60°С) та обмеженого простору (20 кДж).



Рисунок 3 – Відпрацювання вправ на тренажерах

Джерело: розроблено авторами

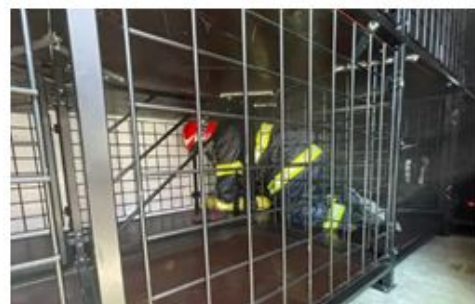


Рисунок 4 – Проходження теплодимокамери-лабіринту

Джерело: розроблено авторами

Водночас в автоматичному режимі фіксуються (рис. 5): діапазон серцебиття  $\Delta f$  від мінімального  $f_{\min}$  до максимального  $f_{\max}$  значення ЧСС [уд./хв], об'єм  $Q$  використаного повітря [л] та тривалість  $t$  [с] безперервного виконання визначених вправ та проходження лабіринту в умовах



підвищеної температури. Наявність об'єму  $Q$  та тривалості  $t$  дає змогу одночасно оцінити і показник легеневої вентиляції газодимозахисника

$$\omega = \frac{Q \cdot 60}{t} \quad [\text{л/хв}] \quad (1),$$

який відповідно до [16] використовують під час проведення аварійно-рятувальних робіт для прогнозування часу оперативної діяльності в непридатному для дихання середовищі.

MAW-Containeranlage

(дата) 12.10.2022 (час) 12:05 пройшов тренувальний лабіринт.  
Start: 15:31:14, Ende: 15:46:9, Gesamtübungszeit: 00:14:55

Тренувальне заняття зараховано

казник продуктивності в кДж: 80,0  
тична продуктивність в кДж: 80,8

Тренажер	Навантаження	Навантажені
Endlosleiter (mit Manipulation)	15,0	15,7
ERGO-FIT Fahrrad	30,0	30,0
Laufband	10,0	10,1
MAW Schlaghammer	5,0	5,0
Перший рівень лабіринту	20,0	20,0
Другий рівень лабіринту:	0,0	0,0

	Перед початком заняття	Після завершення заняття
Тиск заправки балона:	300	100
Діастолічний артеріальний		
Систолічний артеріальний		
Пульт:		

Витрати повітря: 1200,0 Літри

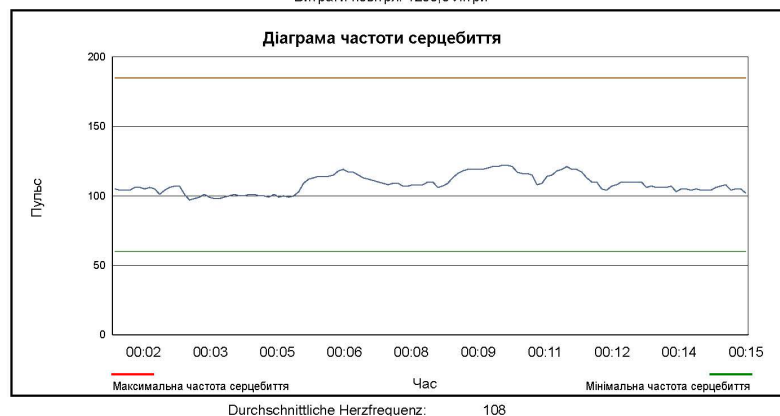


Рисунок 5 – Зразок звіту, що формується за результатами проведення практичних занять на мобільному тренажері

Таким чином, використання мобільного тренажера виробництва компанії MAW GmbH дає змогу організувати проведення порівняльних експериментальних досліджень найбільш важливих показників оперативної діяльності в непридатному для дихання середовищі (частоти серцевих скорочень, об'єму використаного повітря, часу безперервного виконання визначеного та однакового для всіх досліджуваних набору вправ, а також легеневої вентиляції), за

Джерело: розроблено авторами

якими можна порівняти газодимозахисників різних вікових груп.

Статистичний порівняльний аналіз отриманих експериментальних результатів. Спочатку отримані результати (табл. 1, табл. 2), оскільки у кожному випадку використовувалися вибірки з об'ємом  $n = 20 < 30$ , були перевірені на нормальність розподілу за критерієм Шапіро-Уїлкі [17].

Таблиця 1 – Експериментальні результати тих досліджуваних, у яких вік не перевищував 40 років

№	$f_{\min}$ , уд./хв	$f_{\max}$ , уд./хв	$\Delta f$ , уд./хв	Q, л	t, с	t, хв	$\omega$ , л/хв
1	94	120	26	1200	895	14,92	80,45
2	60	170	110	1150	780	13,00	88,46
3	120	160	40	900	773	12,88	69,86
4	130	165	35	1200	696	11,60	103,45
5	140	170	30	1260	784	13,07	96,43
6	130	180	50	1020	600	10,00	102,00
7	120	170	50	1200	883	14,72	81,54
8	130	170	40	1080	919	15,32	70,51
9	120	180	60	1140	829	13,82	82,51
10	120	170	50	900	707	11,78	76,38
11	130	160	30	1080	870	14,50	74,48
12	110	170	60	960	883	14,72	65,23
13	150	180	30	980	708	11,80	83,05
14	130	170	40	1140	765	12,75	89,41
15	120	170	50	1380	942	15,70	87,90
16	130	160	30	1320	908	15,13	87,22
17	120	165	45	1140	830	13,83	82,41
18	80	160	80	1200	729	12,15	98,77
19	110	170	60	1140	654	10,90	104,59
20	130	160	30	1160	774	12,90	89,92

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 2 – Експериментальні результати тих досліджуваних, у яких вік був від 40 до 50 років

№	f min, уд./хв	f max, уд./хв	$\Delta f$ , уд./хв	Q, л	t, с	t, хв	$\omega$ , л/хв
1	140	170	30	1320	932	15,53	84,98
2	90	175	85	1140	744	12,40	91,94
3	140	190	50	1500	924	15,40	97,40
4	120	180	60	1200	909	15,15	79,21
5	120	160	40	1260	940	15,67	80,43
6	120	180	60	1200	1037	17,28	69,43
7	140	180	40	960	959	15,98	60,06
8	150	185	35	1320	1110	18,50	71,35
9	130	185	55	1200	1180	19,67	61,02
10	110	185	75	1500	1044	17,40	86,21
11	110	170	60	1080	1030	17,17	62,91
12	160	190	30	1440	900	15,00	96,00
13	130	190	60	1200	926	15,43	77,75
14	80	180	100	1500	790	13,17	113,92
15	80	170	90	960	730	12,17	78,90
16	120	185	65	1320	978	16,30	80,98
17	120	190	70	1200	985	16,42	73,10
18	100	180	80	1020	760	12,67	80,53
19	90	180	90	960	825	13,75	69,82
20	110	185	75	1110	858	14,30	77,62

Джерело: розроблено авторами

Для цього, наприклад, спочатку були розраховані середні значення тривалості виконання газодимозахисниками, вік яких не перевищував 40 років, на мобільному тренажері визначеного переліку вправ

$$\bar{t}(< 40) = \frac{\sum_{i=1}^n t(< 40)_i}{n} = 796,45 \text{ с}, \quad (2)$$

де  $t(< 40)_i$  – час виконання  $i$ -м газодимозахисником контрольного завдання, с; середньоквадратичне відхилення

$$\sigma(< 40) = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (t(< 40)_i - \bar{t}(< 40))^2} = 95,35 \text{ с}, \quad (3)$$

та

$$n \cdot m_2 = \sum_{i=1}^n (t(< 40)_i - \bar{t}(< 40))^2 = 172752,95 \text{ с}^2, \quad (4)$$

де  $m_2$  – вибірковий центральний момент другого порядку.

Оскільки оцінки  $t_i$  є результатом обробки незалежних спостережень, вони були розташовані в порядку неспадання і позначені символами  $t_1, t_2, \dots, t_{n=20}$ . В табл. 3 наведена впорядкована серія отриманих значень часу виконання контрольного завдання. Це дало змогу обчислити проміжну суму  $S$  за формулою:

$$S = \sum_{i=1}^k a_{n-i+1} \cdot (t_{(n-i+1)} - t_i) = 408,31 \quad (5)$$

де  $k$  – індекс, який має значення від 1 до  $n/2 = 10$ ;  $a_{n-i+1}$  – коефіцієнт, який має спеціальні значення для обсягу вибірки  $n$  (його значення, що наведені в табл. 2, взяті з табл. 10 [18]).

Таблиця 11 [17] для рівня значущості  $\alpha = 0,05$  та  $n = 20$  дає значення  $W_{\text{табл}} = 0,905$ .

Таблиця 3 – Упорядкована серія отриманих значень тривалості виконання контрольної вправи газодимозахисниками, вік яких не перевищував 40 років

k	$t_{(20-k+1)}, \text{ с}$	$t_k, \text{ с}$	$t_{(20-k+1)} - t_k, \text{ с}$	$a_{n-k+1}$	$a_{n-k+1} \cdot (t_{(20-k+1)} - t_k)$
1	2	3	4	5	6
1	942	600	342	0,4493	153,6606
2	919	654	265	0,3098	82,097
3	908	696	212	0,2554	54,1448
4	895	707	188	0,2145	40,326
5	883	708	175	0,1807	31,6225
6	883	729	154	0,1512	23,2848
7	870	765	105	0,1245	13,0725
8	830	773	57	0,0997	5,6829
9	829	774	55	0,0764	4,202
10	784	780	4	0,0539	0,2156
S					408,31
S <sup>2</sup>					166716

Джерело: розроблено авторами

Оскільки

$$W = \frac{S^2}{n \cdot m_2} = \frac{166716}{172752} = 0,965 \geq W_{\text{табл}} = 0,905, \quad (5)$$

розподіл відповідно до [17] вважається нормальним.

Розрахунки відповідно до (2)–(5) були виконані й для інших показників діяльності газодимозахисників, які були обрані для розгляду. В узагальненому вигляді вони наведені в табл. 4.

Таблиця 4 – Узагальнені результати оцінки показників, які характеризують виконання газодимозахисниками контрольної вправи на мобільному тренажері

	f min, уд./хв.	f max, уд./хв.	Δf, уд./хв.	Q, л	t, с	t, хв.	ω, л/хв.
Газодимозахисники, у яких вік не перевищував 40 років							
$\bar{x}$	118,70	166,00	47,30	1127,50	796,45	13,27	85,73
$\sigma_x$	20,57	12,63	20,24	127,93	95,35	1,59	11,37
W	0,809	0,664	0,928	0,931	0,965	0,965	0,962
Газодимозахисники, у яких вік був понад 40 років							
$\bar{x}$	118,00	180,50	62,50	1219,50	928,05	15,47	79,68
$\sigma_x$	22,38	8,09	20,81	177,42	120,58	2,01	13,21
W	0,945	0,882	0,955	0,919	0,955	0,955	0,921

Джерело: розроблено авторами

Аналіз результатів, які наведені в табл. 4, показує, що є випадки, коли у деяких газодимозахисників ЧСС суттєво відрізняється від такого показника у інших. Водночас, якщо такий ефект для газодимозахисників, у яких вік не перевищує 40 років, спостерігається як для мінімального, так і максимального значення ЧСС, то для тих, у кого вік складав понад 40 років, вибірка є неоднорідною тільки для показника, який характеризує максимальне значення ЧСС.

Перевірка того, наскільки значуще відрізняються математичні очікування показників, які розглядаються, була виконана за t-критерієм Стьюдента.

Для цього, наприклад, для ситуацій, коли порівнюється загальний час виконання контрольної справи різними віковими групами, розглядалась гіпотеза

$$H_0 : \bar{t}(> 40) = \bar{t}(< 40) \quad (6)$$

та її альтернатива

$$H_1 : \bar{t}(> 40) \neq \bar{t}(< 40), \quad (7)$$

яка доводить відмінність середніх значень.

З метою вибору конкретної методики розрахунку t-критерію [18] спочатку була перевірена гіпотеза про рівність дисперсій. Як критерій для перевірки нуль-гіпотези

$$H_0 : \sigma(< 40) = \sigma(40) \quad (8)$$

був вибраний F-критерій

$$F = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} = \frac{14539,00}{9092,26} = 1,60, \quad (9)$$

де  $\sigma_1^2$  – більша з оцінок дисперсій у двох вибірках.

Водночас критичне значення  $F_{кр}$ , яке за рівня значущості  $\alpha = 0,05$  та числа ступенів свободи

$$\begin{aligned} \nu(< 40) &= n(< 40) - 1 = 19 \\ \nu(> 40) &= n(> 40) - 1 = 19 \end{aligned}, \quad (10)$$

де  $n_{верт} = n_{супр} = 20$  – кількість газодимозахисників у кожній віковій групі, які виконували контрольне завдання, дорівнює [19]

$$F_{кр} = F_{табл} = 2,15 \quad (11)$$

Видно, що в розглянутому випадку правомірною визнається нуль-гіпотеза (8) та допускається рівність дисперсій загального часу виконання контрольної справи різними віковими групами.

Розрахунки відповідно до (8)–(11) були виконані й для інших показників діяльності газодимозахисників, які були вибрані для розгляду. В узагальненому вигляді результати оцінювання критерію Фішера наведені в табл. 5. Її аналіз показує, що для розрахунку критерію Стьюдента необхідно використовувати різні методики. Це спричинено тим, що у разі порівняння дисперсій розподілу максимальних показників ЧСС

$$F(f_{max}) = 2,43 = F_{кр} = 2,15 \quad (12)$$

Таблиця 5 – Узагальнені результати оцінки показників критерію Фішера, які характеризують відмінність виконання газодимозахисниками контрольної вправи на мобільному тренажері

	f min, уд./хв	f max, уд./хв	Δf, уд./хв	Q, л	t, с	t, хв	w, л/хв
F	1,18	2,43	1,06	1,92	1,60	1,60	1,35

Джерело: розроблено авторами

З огляду на табл. 5, крім випадку оцінювання критерію Стьюдента для порівнювання середніх значень максимальної ЧСС, стандартна помилка різниці  $S_{<40->40}$  з урахуванням того, що вибірки малого розміру (<30) та число

ступенів свободи  $\nu$  у разі обчислення t-критерію розраховуються [18] таким чином (як приклад розглядається порівняння математичних очікувань часу виконання контрольної вправи різними віковими групами)

$$S_{<40->40} = \sqrt{\frac{(n_{<40} - 1) \cdot \sigma_{<40}^2 + (n_{>40} - 1) \cdot \sigma_{>40}^2}{n_{<40} + n_{>40} - 2} \cdot \left( \frac{1}{n_{<40}} + \frac{1}{n_{>40}} \right)} = \sqrt{\frac{(20 - 1) \cdot 9092 + (20 - 1) \cdot 14539}{20 + 20 - 2} \cdot \left( \frac{1}{20} + \frac{1}{20} \right)} = 34,37; \quad (13)$$

$$\sigma = n_{\text{л}}(\text{п}) + n_{\text{л}}(\text{к}) - 2 = 38 \quad (14)$$

$$\sigma = n_{\text{л}}(\text{п}) + n_{\text{л}}(\text{к}) - 2 = 38 \quad (14)$$

У результаті

$$t_{\text{набл}} = \frac{|\bar{t}_{\text{верт}} - \bar{t}_{\text{супр}}|}{S_{t_{<40-t>40}}} = \frac{|9092,26 - 14539,00|}{34,37} = 3,83 \quad (15)$$

Оскільки

$$t_{\text{набл}} = 3,83 > t_{\text{табл}}(\alpha = 0,05) = 2,15, \quad (16)$$

можна стверджувати, що у разі рівня значущості  $\alpha=0,05$  результати часу виконання контрольної вправи різними віковими групами відрізняються суттєво. Для порівнювання середніх значень

максимальної ЧСС стандартна помилка різниці  $S(f_{\text{max}})_{<40->40}$  і число ступенів свободи  $\nu$  у разі обчислення t-критерію були розраховані таким чином

$$S(f_{\text{max}})_{<40->40} = \sqrt{\frac{\sigma_{<40}^2(f_{\text{max}})}{n_{<40}} + \frac{\sigma_{>40}^2(f_{\text{max}})}{n_{>40}}} = 3,35, \quad (17)$$

$$\nu = \frac{\left( \frac{\sigma_{<40}^2(f_{\text{max}})}{n_{<40}} + \frac{\sigma_{>40}^2(f_{\text{max}})}{n_{>40}} \right)^2}{\frac{\sigma_{<40}^4(f_{\text{max}})}{n_{<40}^2 \cdot (n_{<40} - 1)} + \frac{\sigma_{>40}^4(f_{\text{max}})}{n_{>40}^2 \cdot (n_{>40} - 1)}} = 32,36 \quad (18)$$

У результаті

$$t_{\text{набл}} = \frac{|\bar{f}_{\text{max}} (< 40) - \bar{f}_{\text{max}} (> 40)|}{S(f_{\text{max}})_{<40 \rightarrow 40}} = \frac{|166,0 - 180,5|}{3,35} = 4,32 > t_{\text{табл}} (\alpha = 0,05) = 2,04, \quad (19)$$

тобто, значення t-критерію  $t_{\text{набл}}$  більше критичного значення t-критерію  $t_{\text{табл}}$  за заданого рівня значущості  $\alpha=0,05$  і числа ступенів свободи  $\nu$ . Це свідчить про те, що на рівні значущості  $\alpha$  (ймовірність похибки менше 5%) можна прийняти гіпотезу  $H_0$ . Отже, відмінність

математичних очікувань максимальних значень ЧСС, отриманих у різних вікових групах, є значущою.

В узагальненому вигляді результати оцінювання того, наскільки значуще відрізняються математичні очікування показників, які розглядаються, за t-критерієм Стьюдента, наведені в табл. 6.

Таблиця 6 – Узагальнені результати оцінювання того, наскільки значуще відрізняються математичні очікування показників, які розглядалися

	f min, уд./хв	f max, уд./хв	$\Delta f$ , уд./хв	Q, л	t, с	t, хв	$\omega$ , л/хв
$t_{\text{набл}}$	0,10	4,32	2,34	1,88	3,83	3,83	1,55
$t_{\text{табл}} (\alpha = 0,05)$	2,15	2,04	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15

Джерело: розроблено авторами

Видно, що за рівнем значущості  $\alpha=0,05$  можна сверджувати про те, що показники мінімальних значень ЧСС (рис. 6), витрат повітря (рис. 9) та легеневої вентиляції (рис. 11) збігаються, а для показників максимальних значень ЧСС

(рис. 7), діапазону серцебиття від мінімального до максимального (рис.8) та часу виконання контрольної вправи (рис. 10) газодимозахисниками різних вікових груп на мобільному тренажері, їх відмінності є значущими.

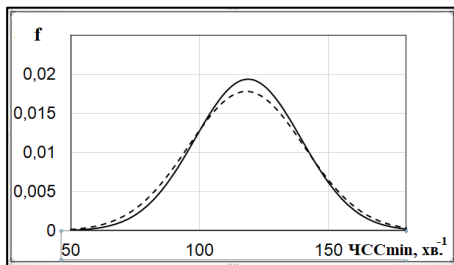


Рисунок 6 – Розподіли мінімальної ЧСС залежно від віку газодимозахисників

Джерело: розроблено авторами

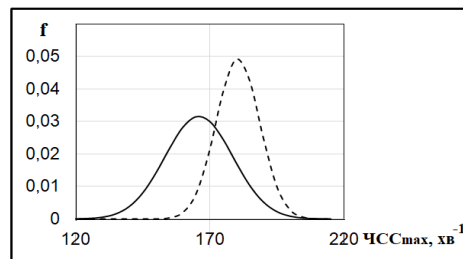


Рисунок 7 – Розподіли максимальної ЧСС залежно від віку газодимозахисників

Джерело: розроблено авторами

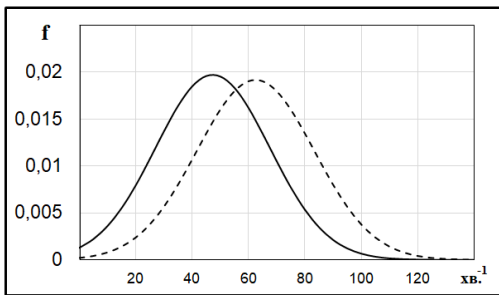


Рисунок 8 – Розподіли діапазонів серцебиття залежно від віку газодимозахисників

Джерело: розроблено авторами

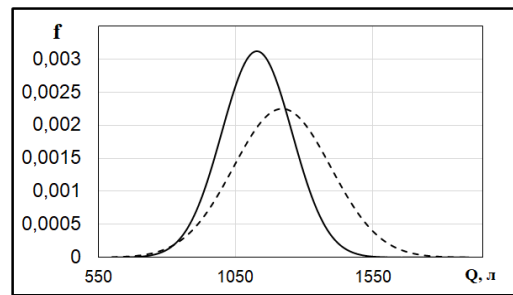


Рисунок 9 – Розподіли витрат повітря в АСП залежно від віку газодимозахисників

Джерело: розроблено авторами

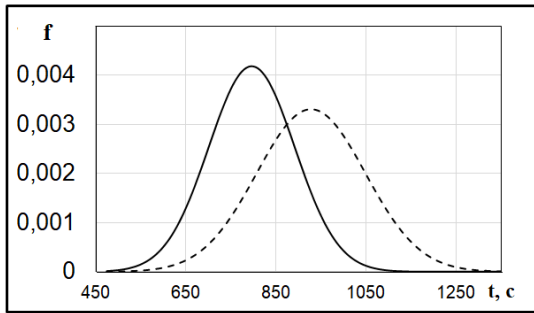


Рисунок 10 – Розподіли часу виконання контрольних завдань залежно від віку газодимозахисників

Джерело: розроблено авторами

Таким чином, результати статистичного оцінювання експериментальних результатів, які були отримані під час виконання визначених контрольних вправ на мобільному тренажері виробництва компанії MAW GmbH, який на сьогодні найбільш повно відтворює умови роботи пожежників-рятувальників у непридатному для дихання середовищі, підтвердили можливість проведення за рівня значущості  $\alpha=0,05$  порівняльного аналізу показників, що характеризують діяльність газодимозахисників різних вікових груп.

*Обговорення результатів порівняльного статистичного аналізу щодо того, як вік газодимозахисника впливає на показники, які характеризують результати його діяльності*

Хоча до виконання контрольних завдань допускались газодимозахисники, у яких ЧСС не перевищувала 80 уд./хв, сам процес включення в АСП та очікування роботи в екстремальних умовах є значущим стрес-фактором для газодимозахисників усіх вікових груп. Водночас більшість пожежників-рятувальників молодшої вікової групи та всі старшої мали багаторічний досвід гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій в засобах індивідуального захисту органів дихання.

Початок виконання завдання газодимозахисником у непридатному для дихання середовищі з ЧСС, яка перевищує 120 уд./хв, є свідченням того, що під час виконання вправи його стан потребує особливого постійного контролю з боку

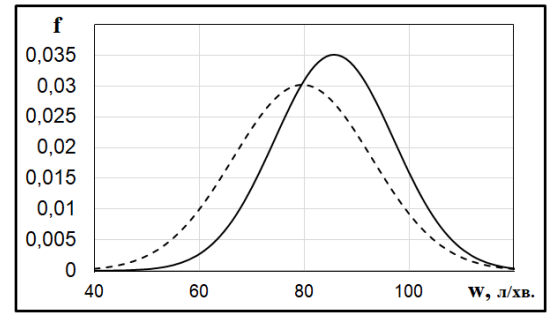


Рисунок 11 – Розподіли легеневої вентиляції залежно від віку газодимозахисників

Джерело: розроблено авторами

керівника занять. Окремо треба звернути увагу на газодимозахисників старших вікових груп, у яких ЧСС підвищується не тільки до 150 уд./хв (цей рівень ЧСС відповідає середині діапазону для особового складу старшої вікової групи), а й починає перевищувати 180 уд./хв, що вже є небезпечним для здоров'я. Для пожежників-рятувальників молодшої вікової групи такого контролю потребують газодимозахисники, у яких ЧСС починає перевищувати 165 уд./хв, що відповідає середній оцінці максимального значення ЧСС.

У процесі оперативного контролю та планування діяльності газодимозахисників на посту безпеки доцільно враховувати, що час виконання оперативного завдання в непридатному для дихання середовищі у особового складу старшої вікової групи може бути більшим на 15–20%. За рахунок цього він, на наш погляд, намагається не допустити збільшення індивідуальної ЧСС до рівня, який кожен вважає для себе критичним. Крім цього, деяке збільшення часу у старших газодимозахисників призводить до того, що рівень легеневої вентиляції стає практично однаковим ( $\approx 80$  л/хв) у всього особового складу, коли він працює в непридатному для дихання середовищі.

Потребує корегування показник легеневої вентиляції ( $\approx 40$  л/хв), який є рекомендованим для розрахунку часу роботи в ізолювальних апаратах згідно з [16]. Отримані результати свідчать про те, що на посту безпеки під час попередніх розрахунків для газодимозахисників всіх

вікових груп доцільно використовувати показник легеневої вентиляції  $\omega_{л} \approx 80$  л/хв. Для апаратів з об'ємом балона  $V_6=8$  л це дає можливість перейти до спрощеної оцінки того, як змінюється тиск  $P$  в АСП під час роботи в непридатному для дихання середовищі,

$$\frac{\Delta P}{\Delta t} \approx 1 \text{ МПа} / \text{хв} \approx 10 \text{ бар} / \text{хв}$$

Крім цього, на посту безпеки під час контролю оперативних дій ланки ГДЗС в непридатному для дихання середовищі треба розуміти, що у деяких членів ланки легенева вентиляція може бути на рівні  $\omega_{л \max} = \bar{\omega}_{л} + 3 \cdot \sigma_{\omega_{л}} \approx 120$  л/хв.

І в цьому разі, наприклад для АСП з  $V_6=8$ , швидкість падіння тиску у них буде  $\frac{\Delta P}{\Delta t} \approx 1,5 \text{ МПа} / \text{хв} \approx 15 \text{ бар} / \text{хв}$

Отже, без урахування запасу повітря на непередбачені обставини, який відповідає  $P_{рез}=5$  МПа=50 бар, якщо характер оперативної роботи не є відомим, на посту безпеки треба планувати діяльність ланок ГДЗС таким чином, щоб вони змінювались через 15–20 хвилин.

Сильною стороною здобутих результатів є отримання з рівнем значущості  $\alpha=0,05$  статистичних оцінок результатів діяльності газодимозахисників різних вікових груп через виконання контрольних вправ на мобільному тренажері виробництва компанії MAW GmbH, який на сьогодні найбільш повно відтворює умови роботи рятувальників у непридатному для дихання середовищі. Аналіз результатів дав змогу визначити конкретні практичні рекомендації.

Слабкою стороною застосування обраного підходу є необхідність отримання нових вихідних даних у разі вибору нових характеристик, які потребують свого дослідження. Відповідно не завжди наявний тренажер може відтворити умови, в яких працюють газодимозахисники. Наприклад, якщо необхідно оцінити роботу газодимозахисників у метрополітені, під час ліквідації надзвичайних ситуацій з викидами небезпечних хімічних або радіоактивних речовин, здійсненні рятування потерпілих

на висоті в умовах перебування в безпорному просторі, а також, що є особливо актуальним нині, проведенні аварійно-рятувальних робіт в умовах війни з росією.

### **Висновки та напрями подальших досліджень.**

1. Невирішеною частиною проблеми підвищення ефективності ліквідації надзвичайних ситуацій, пов'язаних з оперативною діяльністю пожежників-рятувальників у непридатному для дихання середовищі, є брак відомостей щодо того, як вік газодимозахисника впливає на показники, що характеризують результати його діяльності.

2. Використання мобільного тренажера контейнерного типу виробництва компанії MAW GmbH дає змогу організувати проведення порівняльних експериментальних досліджень найбільш важливих показників оперативної діяльності в непридатному для дихання середовищі (серцебиття, об'єму використаного повітря, тривалості безперервного виконання визначеного та однакового для всіх досліджуваних набору вправ та легеневої вентиляції), за якими можна порівняти газодимозахисників різних вікових груп.

3. Дані статистичного оцінювання експериментальних результатів, які були отримані під час виконання визначених контрольних вправ на мобільному тренажері виробництва компанії MAW GmbH, який на сьогодні найбільш повно відтворює умови роботи пожежників-рятувальників у непридатному для дихання середовищі, підтвердили можливість проведення за рівня значущості  $\alpha=0,05$  порівняльного аналізу показників, що характеризують діяльність газодимозахисників різних вікових груп.

4. Незважаючи на те, що практично всі залучені до проведення експериментальних досліджень газодимозахисники мали багаторічний досвід ліквідації надзвичайних ситуацій в засобах індивідуального захисту органів дихання, сам процес включення в АСП та очікування роботи в екстремальних умовах



є значущим стрес-фактором для рятувальників усіх вікових груп.

5. Як практичні рекомендації, які отримано за результатами порівняльної статистичної оцінки експериментальних результатів діяльності газодимозахисників, можна виділити:

- процес включення в АСП та очікування роботи в екстремальних умовах є значущим стрес-фактором для газодимозахисників усіх вікових груп;

- під час проведення газодимозахисниками практичних занять в ізолювальних апаратах особливу увагу звертати на рятувальників старшої вікової групи, у яких ЧСС починає перевищувати 150 уд./хв, для молодшої вікової групи такого контролю потребує особовий склад, у якого ЧСС починає перевищувати 165 уд./хв;

- у процесі оперативного контролю та планування діяльності газодимозахисників на посту безпеки доцільно враховувати, що час виконання оперативного завдання в непридатному для дихання середовищі у особового складу старшої вікової групи може бути більшим на 15–20%;

- на посту безпеки під час попередніх розрахунків часу роботи в АСП для газодимозахисників усіх вікових груп доцільно використовувати показник легеневої вентиляції  $\omega_r \approx 80$  л/хв;

- можливість використання спрощених розрахунків часу роботи в АСП. Так, у разі роботи в АСП з об'ємом балона 8 л загалом можна використовувати показник швидкості падіння тиску

$$\frac{\Delta P}{\Delta t} \approx 1 \text{ МПа} / \text{хв} \approx 10 \text{ бар} / \text{хв};$$

також на посту безпеки доцільно планувати діяльність ланок ГДЗС таким чином, щоб вони змінювались, якщо є необхідність у довготривалому проведенні аварійно-рятувальних робіт, через кожні 15–20 хв.

Надалі під час наукових розвідок підвищену увагу потрібно приділити аналізу діяльності газодимозахисників в умовах проведення аварійно-рятувальних робіт за військового впливу росії, зокрема, оперативної діяльності одночасно в ізолювальних апаратах та засобах бронезахисту.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про забезпечення ведення обліку пожеж та їх наслідків : наказ ДСНС від 16 серпня 2017 р. № 445. URL : <http://www.dsns.gov.ua/ua/Nakazi/66412> (дата звернення : 09.03.2023).
2. Steven A. Kahn, MD, Tina L. Palmieri, MD, Soman Sen, MD, Jason Woods, FF, Oliver L. Gunter, MD, Factors Implicated in Safety-related Firefighter Fatalities. *Journal of Burn Care & Research*. 2017. Volume 38, Issue 1. P. 83–88.
3. Broderick Otis Wesley. Air Consumption and Air Management in the Fire Service : Master Theses / Eastern Kentucky University. Kentucky, 2017. 477 p.
4. Asgeir Mamen, Erna Diana von Heimburg, Harald Oseland & Jon Ingulf Medbø. Examination of a new functional firefighter fitness test. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*. 2021. 27:2. P. 460–471.
5. Williams-Bell F.M., Boisseau G., McGill J., Kostjuk A. & Hughson R. Physiological responses and air consumption during simulated firefighting tasks in a subway system. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*. 2010. 35(5). P. 671–678.
6. Стрілець В. М., Бородич П. Ю., Росоха С. В. Закономірності діяльності рятувальників при проведенні аварійно-рятувальних робіт на станціях метрополітену : монографія. Харків : КП Миська друкарня, 2012. 112 с.
7. Richmond V. L., Rayson M. P., Wilkinson D. M., Carter J. M. & Blacker S.D. Physical demands of firefighter search and rescue in ambient environmental conditions. *Ergonomics*. 2008. 51:7. C. 1023–1031.
8. Randy W. Dreger, Richard L. Jones & Stewart R. Petersen. Effects of the self-contained breathing apparatus and fire protective clothing on maximal oxygen uptake. *Ergonomics*. 2006. 49:10. P. 911–920.
9. Jian Li, Yunyi Wang, Rongfan Jiang & Jun Li. Quantifying self-contained breathing apparatus on physiology and psychological responses during firefighting: a systematic review and meta-analysis. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*. 2023. 29:1. P. 77–89.
10. Louhevaara V., Smolander J., Korhonen O. & Tuomi T. Maximal working times with a self-contained breathing apparatus, *Ergonomics*, 1986. 29:1. P. 77–85.
11. Sothmann M., Saupe K., Raven P., Pawelczyk J., Davis P., Dotson C., Landy F. & Siliunas M. Oxygen consumption during fire suppression: error of heart rate estimation. *Ergonomics*. 1991. 34:12. P. 1469–1474.
12. Richard M. Kesler, Ipek Ensari, Rachel E. Bollaert, Robert W. Motl, Elizabeth T. Hsiao-Wecksler, Karl S. Rosengren, Bo Fernhall, Denise L. Smith & Gavin P. Horn. Physiological response to firefighting activities of various work cycles using extended duration and prototype SCBA. *Ergonomics*. 2018. 61:3. P. 390–403.
13. Denise L. Smith, Jeannie M. Haller, Ron Benedict & Lori Moore-Merrell. Cardiac Strain Associated with High-rise Firefighting. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2015. 12:4. P. 213–221.
14. Donovan, K., McConnell, A. Do fire-fighters develop specific ventilatory responses in order to cope with exercise whilst wearing self-contained breathing apparatus?. *Eur J Appl Physiol*. 1999. 80. P. 107–112.
15. Інструкція з експлуатації мобільного тренажера контейнерного типу виробництва компанії / MAW GmbH, 2021. 35 с.

16. Довідник керівника гасіння пожежі / за заг. ред. В. С. Кропивницького. Київ : ТОВ Літера-Друк, 2016. 320 с.
17. Статистичне опрацювання даних. Категорії відхилення від нормального розподілу : ДСТУ ISO 5479:2009 (ISO 5479:1997, IDT) [Чинний з 01.07.2011]. Київ : Держстандарт України, 2009. 34 с.
18. Митропольский А. К. Техника статистических обчислений. М. : Наука, 1971. 576 с.
19. Халафян А.А. STATISTICA 6 Статистичний аналіз даних. М : Бинум-Пресс, 2007. 512 с

## REFERENCES

1. Pro zabezpechennia vedennia obliku pozhezh ta yikh naslidkiv: nakaz DCNS vid 16 serpnia 2017 r. № 445. Retrieved from <http://www.dsns.gov.ua/ua/Nakazi/66412> [in Ukrainian].
2. Steven A. Kahn, MD, Tina L. Palmieri, MD, Soman Sen, MD, Jason Woods, FF, Oliver L. Gunter, MD. (2017). Factors Implicated in Safety-related Firefighter Fatalities. *Journal of Burn Care & Research*. Volume 38, Issue 1. 83–88. doi:10.1097/BCR.0000000000000434 [in English].
3. Broderick, Otis Wesley. (2017). *Air Consumption and Air Management in the Fire Service*. (Master Theses, Master of Science (MS). Eastern Kentucky University, Kentucky [in English].
4. Asgeir Mamen, Erna Diana von Heimburg, Harald Oseland, Jon Ingulf Medbø. (2021). Examination of a new functional firefighter fitness test. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 27:2, 460–471. doi: 10.1080/10803548.2019.1627075 [in English].
5. Williams-Bell F. M., Boisseau G., McGill J., Kostiuk A. & Richard L. Hughson. (2010). Physiological responses and air consumption during simulated firefighting tasks in a subway system. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*. 35(5). 671–678. doi.org/10.1139/H10-061 [in English].
6. Strilets, V. M., Borodich, P. Y., & Rosoha, S. V. (2012). *Zakonomirnosti diialnosti riatuvalnykh pry provedenni avariino-riatuvalnykh rob it na stantsiakh metropolitenu* [Patterns of rescuers' activities during emergency rescue operations at subway stations]. Kharkiv: Municipal enterprise City printing house [in Ukrainian].
7. Richmond V. L., Rayson M. P., Wilkinson D. M., Carter J. M. & Blacker S. D. (2008). Physical demands of firefighter search and rescue in ambient environmental conditions, *Ergonomics*, 51:7, 1023–1031. doi: 10.1080/00140130801939709 [in English].
8. Randy W. Dreger, Richard L. Jones & Stewart R. Petersen. (2006). Effects of the self-contained breathing apparatus and fire protective clothing on maximal oxygen uptake. *Ergonomics*, 49:10, 911–920. doi: 10.1080/0014013060066745 [in English].
9. Jian Li, Yunyi Wang, Rongfan Jiang & Jun Li. (2023). Quantifying self-contained breathing apparatus on physiology and psychological responses during firefighting: a systematic review and meta-analysis. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 29:1, 77–89. doi: 10.1080/10803548.2021.2024020 [in English].
10. Louhevaara V., Smolander J., Korhonen O. & Tuomi T. (1986). Maximal working times with a self-contained breathing apparatus. *Ergonomics*, 29:1, 77–85. doi: 10.1080/00140138608968242 [in English].
11. Sothmann M., Saupé K., Raven P., Pawelczyk J., Davis P., Dotson C., Landy F. & Siliunas M. (1991). Oxygen consumption during fire suppression: error of heart rate estimation. *Ergonomics*, 34:12, 1469–1474. doi: 10.1080/00140139108964890 [in English].
12. Richard M. Kesler, Ipek Ensari, Rachel E. Bollaert, Robert W. Motl, Elizabeth T. Hsiao-Weckler, Karl S. Rosengren, Bo Fernhall, Denise L. Smith & Gavin P. Horn. (2018). Physiological response to firefighting activities of various work cycles using extended duration and prototype SCBA. *Ergonomics*, 61:3, 390–403. doi: 10.1080/00140139.2017.1360519 [in English].
13. Denise L. Smith, Jeannie M. Haller, Ron Benedict & Lori Moore-Merrell. (2015). Cardiac Strain Associated with High-rise Firefighting. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 12:4, 213–221. doi: 10.1080/15459624.2014.970272 [in English].
14. Donovan, K., McConnell, A. (1999). Do fire-fighters develop specific ventilatory responses in order to cope with exercise whilst wearing self-contained breathing apparatus? *Eur J Appl Physiol*, 80, 107–112. doi.org/10.1007/s004210050565 [in English].
15. MAW GmbH. (2021). *Instruktsiia z ekspluatatsii mobilnoho trenazheru konteinerneho typu vyrobnytstva kompanii* [Instructions for use of the container-type mobile simulator manufactured by the company] [in Ukrainian].
16. Kropyvnytskyi V.S. (Ed.) (2016). *Dovidnyk kerivnyka hasinnia pozhezhi* [Handbook of the head of fire extinguishing]. Kyiv: TOV Litera-Druk [in Ukrainian].
17. *Statystychnne opratsiuvannia danykh. Katehorii vidkhylennia vid normalnoho rozpodilu* [Statistical interpretation of data – Tests for departure from the normal distribution]. (2009). DСТU ISO 5479:2009 (ISO 5479:1997, IDT) from 1<sup>st</sup> July 2011. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian].
18. Mitropol'skij, A. (1971). *Tekhnika statystychnykh obchyslen* [The technique of statistical calculations]. Nauka [in Russian].
19. Khalafyan, A. (2007). *STATISTICA 6 Statystychnyi analiz danykh*. Binom-Press [in Russian].

## COMPARATIVE ANALYSIS OF THE ACTIVITY OF GAS SMOKE PROTECTORS DIFFERENT AGE GROUPS

T. Skorobahatko<sup>1</sup>, S. Yeremenko<sup>1</sup>, A. Pruskyi<sup>1</sup>, V. Sydorenko<sup>1</sup>, I. Saveliev<sup>2</sup>, V. Strelets<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>*Department of the State Emergency Service of Ukraine in the Luhansk region, Ukraine*

<sup>3</sup>*National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine*

---

### KEYWORDS:

gas smoke  
protectors, age,  
mobile simulator,  
experimental studies,  
statistical analysis.

### ANNOTATION

The conducted analysis showed that an important and unresolved part of the problem of increasing the efficiency of liquidation of emergency situations related to the operational activities of firefighters and rescuers in an environment unsuitable for breathing is the lack of information about how the age of the gas smoke protection device affects the indicators characterizing the results, in that in this case physiological, performance of professionally important tasks. Comparative experimental studies of the results of the activities of gas and smoke rescuers of two age groups in compressed air apparatus (ASP) in a container-type mobile simulator manufactured by MAW GmbH (mobile simulator), which most fully reproduces the working conditions of rescuers in an environment unsuitable for breathing, were carried out, with their further statistical analysis. Statistical analysis of the obtained results was carried out with a significance level of  $\alpha=0.05$ . It was determined that for gas and smoke protection workers of all age groups, the very process of inclusion in ASP and the expectation of working in extreme conditions is a significant stress factor for personnel of all age groups. Relevant practical recommendations are offered, in particular: during practical training in compressed air apparatuses by gas and smoke protection officers, special attention should be paid to firefighters and rescuers of the older age group, whose heart rate (HR) begins to exceed 150 beats/min, for the younger age group such control is required by personnel whose heart rate begins to exceed 165 bpm; in the process of operational control and planning of the activities of gas and smoke protection officers at the security post, it is advisable to take into account that the time required to perform an operational task in an environment unsuitable for breathing may be 15-20% longer for personnel of the older age group; at the post of safety during the preliminary calculations of the working time in the ASP for gas and smoke protection devices of all age groups, it is advisable to use the pulmonary ventilation indicator  $\omega_{\pi} \approx 80$  l/min; at the security post, it is advisable to use simplified calculations of working time in ASP. So, for cases of work in an emergency response system with a cylinder volume of 8 l, in general, you can use the indicator of the rate of pressure drop, also at the security post, it is advisable to plan the activities of the units of the GDSS in such a way that they change, if there is a need for long-term emergency and rescue operations, due to 15–20 min.

УДК 614.841

## ОБҐРУНТУВАННЯ ОСНАЩЕНОСТІ ТЕРИТОРІЇ ВІДКРИТИХ РОЗПОДІЛЬНИХ УСТАНОВОК 750/330 КВ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ПЕРВИННИМИ ЗАСОБАМИ ПОЖЕЖОГАСІННЯ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1.56-65>

Фещук Ю. Л. ORCID iD 0000-0003-4328-8473  
Голікова С. Ю., ORCID iD 0000-0002-7793-2901  
Жихарев О. П., ORCID iD 0000-0003-4323-1880  
Циганков А. О.\* ORCID iD 0000-0003-1971-9640  
\*E-mail: 0502879336@ukr.net

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

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

АНОТАЦІЯ

*Надійшла до редакції: 26.01.2023*

*Пройшла рецензування: 14.02.2023*

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

Ключові слова: первинні засоби пожежогасіння, пожежний щит, території ВРУ 750/330 кВ АЕС, пожежна навантага, системний аналіз, моделювання осередків пожежі.

На основі системного аналізу з використанням трьох альтернативних рішень здійснено вибір найбільш раціонального залежно від визначених критеріїв оцінки, а саме: встановлення пожежних щитів, укомплектованих тими засобами, що можуть бути застосовані з огляду на особливості їх місця розміщення на території відкритих розподільних установок 750/330 кВ (далі – ВРУ) атомних електростанцій (далі – АЕС) у пожежонебезпечних місцях. За результатами комп'ютерного моделювання обґрунтовано площу пожежі на території ВРУ, яка може розвинути до моменту застосування первинного засобу пожежогасіння, а також максимальну відстань від пожежного щита до осередку пожежі. Встановлено, що для забезпечення пожежної безпеки територій ВРУ 330 кВ потрібно передбачити не менше чотирьох пожежних щитів, а для ВРУ 750 кВ – не менше дев'яти. Запропоновано орієнтовну схему їх розміщення. З огляду на загрози та небезпеки територій ВРУ 330/750 кВ АЕС запропоновано необхідну комплектацію пожежних щитів саме тими засобами, які можуть бути використані під час виникнення пожежі.

**Постановка проблеми.** Щороку в Україні на трансформаторних підстанціях, в електророзподільних пунктах у середньому фіксується близько 166 пожеж. Безпосередньо на території відкритих розподільних установок ВРУ 330/750 кВ в середньому виникає шість пожеж. Це своєю чергою створює підґрунтя для вжиття заходів щодо їх попередження та оперативного реагування, в тому числі за допомогою первинних засобів пожежогасіння.

На сьогодні у Правилах пожежної безпеки в Україні передбачено встановлення пожежних щитів на території об'єктів площею понад 200 м<sup>2</sup> із розрахунку один щит (стенд) на 5000 м<sup>2</sup> захищеної площі. Однак у зазначеній вимозі не враховується специфіка

території, котру захищають такі пожежні щити, та доцільність використання засобів, які на них є, за умови, що вони можуть бути використані за призначенням. Це так само створює передумови для удосконалення підходів щодо оснащення первинними засобами пожежогасіння ВРУ, що має вплинути на оптимізацію кількості первинних засобів пожежогасіння, матиме економічну та практичну доцільність. Вказане дасть змогу скоротити матеріальні затрати внаслідок раціонально-оптимізованого розміщення первинних засобів пожежогасіння на території ВРУ, витрати на їх обслуговування, водночас сприятиме забезпеченню належного рівня пожежної безпеки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Чимало науковців

здійснювали дослідження об'єктів енергетики, зокрема атомних електростанцій, ВРУ. Так, у роботі [1] проаналізовано загрози та небезпеки, що трапляються на цих територіях. Встановлено, що основними причинами пожеж, які виникали на таких об'єктах, були: протікання мастила, електричні несправності, проведення робіт із відкритим вогнем, помилки персоналу. Зазначено, що умовою забезпечення пожежної безпеки ВРУ АЕС є якісне врахування пожежного навантаження, яким можуть бути: оливосистеми, кабельні виробни, речовини та матеріали, що тимчасово розміщені на території, крім того, джерела запалювання – відкрите полум'я, механізми, що під час експлуатації перебувають під тиском, а з огляду на це можливі наслідки порушення умов експлуатації.

Питання забезпечення пожежної безпеки об'єктів атомної енергетики розглядалося під час проведення міжнародної науково-практичної конференції в Мумбаї (Індія) [2]. Зокрема, визначено ймовірність виникнення пожеж на таких об'єктах на основі проведеного аналізу. Встановлено, що забезпечення пожежної безпеки безпосередньо залежить від справності наявного електрообладнання та дотримання правил безпеки праці.

Досить суттєві напрацювання щодо пожежної безпеки електроустановок, зокрема атомних електростанцій, викладені в роботі [3]. Вона присвячена ймовірнісній оцінці пожежної безпеки таких об'єктів, що дає можливість спрогнозувати виникнення пожежі на території підприємства. Схожими за змістом є наукові праці [4–5], в яких по суті зроблено історичний огляд пожежної безпеки об'єктів атомних електростанцій та особливостей протипожежних заходів у межах ризик-інформованого ухвалення рішень.

Аналіз літературних джерел показав, що кожне з досліджень має свої особливості та не створює умов для забезпечення належного рівня пожежної

безпеки територій ВРУ АЕС, в тому числі із їх забезпеченням первинними засобами пожежогасіння. Це своєю чергою підтверджує актуальність дослідження.

**Формулювання цілей дослідження.** Метою цієї роботи є визначення необхідної кількості та виду первинних засобів пожежогасіння для забезпечення пожежної безпеки територій ВРУ 750/330 кВ АЕС.

Для досягнення поставленої мети сформувані такі задачі:

- дослідити стан пожежної безпеки територій ВРУ 750/330 кВ АЕС;
- провести аналіз нормативної бази щодо забезпечення пожежної безпеки АЕС;
- здійснити системний аналіз ухвалення управлінського рішення щодо забезпеченості територій ВРУ 750/330 кВ АЕС первинними засобами пожежогасіння;
- провести FDS-моделювання процесу гасіння осередків пожежі на територіях ВРУ 750/330 кВ АЕС первинними засобами пожежогасіння;
- надати пропозиції щодо забезпеченості територій ВРУ 750/330 кВ АЕС первинними засобами пожежогасіння.

Об'єкт досліджень – процес забезпечення пожежної безпеки територій ВРУ 750/330 кВ АЕС.

Предмет досліджень – вплив оснащення необхідної кількості та виду первинних засобів пожежогасіння територій ВРУ 750/330 кВ АЕС на забезпечення їх пожежної безпеки.

**Методи дослідження.** В роботі застосовані основи системного аналізу для ухвалення рішення щодо встановлення та укомплектованості пожежних щитів. За результатами комп'ютерного моделювання обґрунтовано площу пожежі на території ВРУ, яка може розвинути до моменту застосування первинного засобу пожежогасіння, а також максимальну відстань від пожежного щита до осередку пожежі.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** За даними підрозділів територіальних органів ДСНС, упродовж

останніх п'яти років відповідно до п. 161 [6] на трансформаторних підстанціях, електророзподільних пунктах зареєстровано 831 пожежу. Інформацію відповідно до років надано як гістограму (рис. 1).

*Рисунок 1 – Пожежі на трансформаторних підстанціях, електророзподільних пунктах за 2018–2022 роки*

*Джерело: розроблено авторами*

Об'єктом наукових досліджень є територія виробничих та допоміжних будівель ВРУ 750/330 кВ. Ця територія поділена на дві частини: територія з електричним устаткуванням напругою понад 1000 В та виробничими будівлями ВРУ 750 кВ; територія з електричним устаткуванням напругою понад 1000 В та виробничими будівлями ВРУ 330 кВ.

Зовнішнє протипожежне водопостачання забезпечується від 12 пожежних гідрантів (№ 26, 26а, 26б, 27, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47), розміщених на кільцевій мережі зовнішнього протипожежного водопроводу високого тиску діаметром Ø300 мм та пожежних ємностей ППНС (2 x 250 м<sup>3</sup>).

На території ВРУ 750/330 кВ розміщені сім пожежних щитів (п'ять – на ВРУ 750 кВ, два – на ВРУ 330 кВ).

Електричне оливонаповнене обладнання (автотрансформатори, компенсуючі реактори тощо), захищене автоматичними системами пожежогасіння та системами аварійного зливу оливи.

Територія ВРУ 330 кВ має загальну площу 5,75 га, а ВРУ 750 кВ – 23,5 га.

На території ВРУ 330 кВ найбільшу небезпеку створюють трансформатори

напруги типу НКФ-330, трансформатор струму типу ТФРМ-330 Б, а на території ВРУ 750 кВ: АТ – автотрансформатор типу АОДЦТН-333000/750/330, трансформатор ТПР (трансформатор регулюючий) типу ОДЦТНП-92000/150, РМ – реактор оливонаповнений типу РОДЦ-110000/750.

Забезпечення пожежної безпеки території ВРУ 750/330 кВ АЕС безпосередньо пов'язане з виконанням [7]. Зокрема, згідно зі статтею 55 [7] передбачені заходи щодо забезпечення пожежної безпеки.

З метою проведення дослідження стану нормативного-технічного регулювання забезпечення пожежної безпеки територій АЕС, в тому числі ВРУ, проведено аналіз відповідних нормативних документів [7–17].

Проведений аналіз нормативної бази щодо забезпечення пожежної безпеки АЕС, зокрема відкритих розподільних установок, дав змогу виявити основні вітчизняні та міжнародні нормативні документи щодо забезпечення протипожежного захисту таких об'єктів. У цих документах висунуті вимоги як до електрообладнання, так і до територій, на яких воно перебуває.

У [15] не встановлені вимоги щодо оснащення первинними засобами пожежогасіння відкритих розподільчих установок.

У [15] встановлені вимоги щодо оснащення пожежними щитами території об'єкта залежно від площі, однак не враховуються специфіка такого об'єкта, його пожежна навантага. Це все створює передумови для проведення відповідних досліджень щодо необхідної оснащеності пожежними щитами територій відкритих розподільних установок.

На території ВРУ 750/330 кВ АЕС за рік можлива певна кількість пожеж, збитки від яких складають сотні тисяч гривень. З огляду на це пожежна безпека – нагальна проблема, яку можна ефективно вирішувати тільки із застосуванням комплексного підходу, із залученням усіх наявних сил і засобів, які будуть сприяти зменшенню кількості пожеж, обмеженню

їх поширення у разі виникнення, прискоренню реагування, що своєю чергою призведе до зменшення збитків та збільшення ймовірності недопущення загибелі працівників.

Унаслідок проведення аналітичних досліджень виявлені такі проблемні питання:

- через необґрунтоване розміщення пожежних щитів щодо пожежонебезпечних місць на території ВРУ збільшується час реагування на пожежу;

- збільшення часу реагування – збільшення часу гасіння пожежі;

- необґрунтована комплектація пожежних щитів призводить до збільшення матеріальних витрат на засоби, які будуть мати низьку ефективність або й взагалі не використовуватимуться під час ліквідації пожежі;

З огляду на це запропоновано такі альтернативи вирішення зазначених питань:

1) встановлення укомплектованих згідно з вимогами [16] пожежних щитів із розрахунку один щит на 5000 м<sup>2</sup> захищеної площі ВРУ 750/330 кВ АЕС;

2) встановлення укомплектованих згідно з вимогами [16] пожежних щитів у визначених пожежонебезпечних місцях ВРУ 750/330 кВ АЕС;

3) укомплектування пожежних щитів необхідними засобами, в тому числі первинними засобами пожежогасіння, що можуть бути застосовані з огляду на особливості їх місця розміщення із врахуванням граничної відстані до пожежонебезпечних місць територій ВРУ 750/330 кВ АЕС.

На основі методичних рекомендацій, запропонованих у Системному аналізі та

теорії ухвалення рішень [17], проведено оцінку наведених вище альтернативних варіантів методом побудови дерева управлінських рішень.

Як критерії оцінки вибрано:

а) здатність забезпечити належний рівень реагування на потенційну пожежу за допомогою первинних засобів пожежогасіння;

б) витрати на впровадження кожного з альтернативних рішень із врахуванням витрат на обслуговування;

в) поточні витрати за кожним із альтернативних рішень.

Оцінку альтернатив проведено за 10-ти бальною шкалою:

– якщо А і В однаково важливі, заносимо в позицію (А, В) таблиці порівнянь число 1;

– якщо А трохи важливіше В – число 3;

– якщо А значно важливіше В – число 5;

– якщо А явно важливіше В – число 7;

– якщо А за своєю значущістю абсолютно перевершує В – число 9.

Числа 2, 4, 6 і 8 використовуються для полегшення компромісів між оцінками, що злегка відрізняються від основних чисел.

Структура задачі ухвалення рішення наведена на рис. 2. Задача має один ієрархічний рівень з трьома критеріями.

Згідно з деревом оцінки альтернатив найбільш доцільно запроваджувати рішення за альтернативою № 3. Таким чином, найбільш доречним є варіант встановлення пожежних щитів, укомплектованих саме тими засобами, що можуть бути застосовані, враховуючи особливості їх місця розміщення на території ВРУ 750/330 кВ АЕС у пожежонебезпечних місцях.

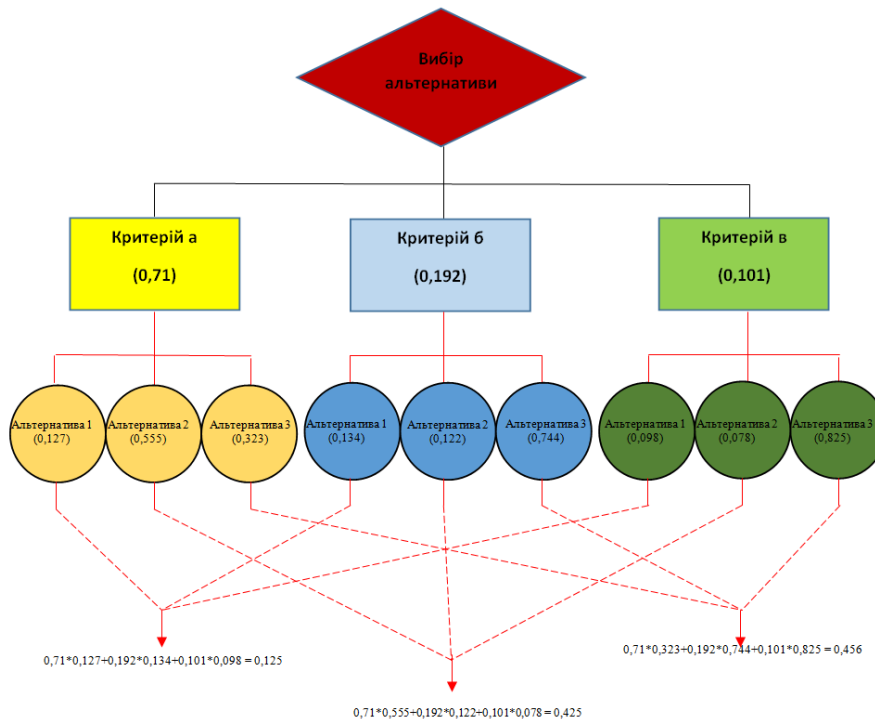


Рисунок 2 – Дерево оцінки альтернатив

Джерело: розроблено авторами

Важливим критерієм, який потрібно врахувати під час визначення кількості пожежних щитів на відкритих територіях (за заданих граничних умов) для реагування на пожежі за допомогою первинних засобів пожежогасіння, є «фактор часу», в який закладено такі вихідні дані:

- швидкість руху працівника до місця розміщення пожежного щита – 2,2 м/с;
- відстань прямування до ПЩ – 160 м;
- швидкість руху працівника від місця розміщення пожежного щита – 1,94 м/с;
- відстань прямування від ПЩ – 160 м;
- тривалість затримки на вжиття заходів щодо ліквідації пожежі – 120 с;
- тривалість затримки на розкриття ПЩ та взяття ПЗП – 60 с.

Виконавши відповідні розрахунки, отримуємо:

- час прямування до пожежного щита – 75 с;
- час прямування від пожежного щита – 82 с;
- час вільного розвитку пожежі – 336 с.

Орієнтовна схема прямування до первинних засобів пожежогасіння наведена на рис. 3.

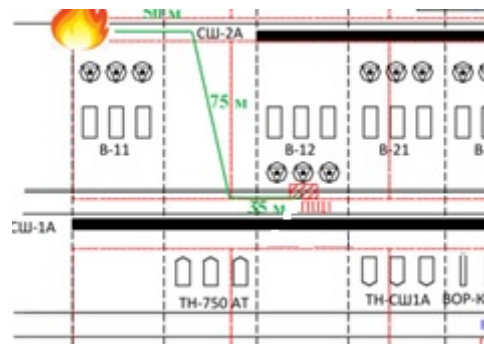
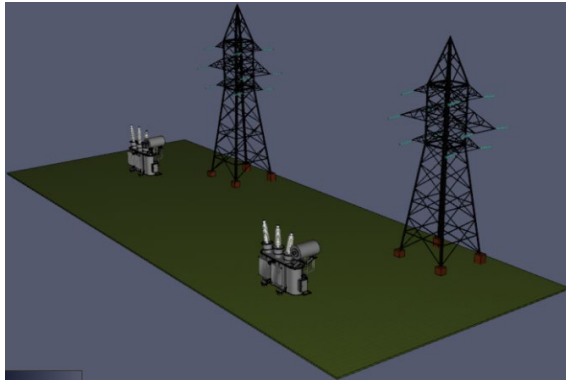


Рисунок 3 – Орієнтовна схема прямування від осередку пожежі до первинних засобів пожежогасіння

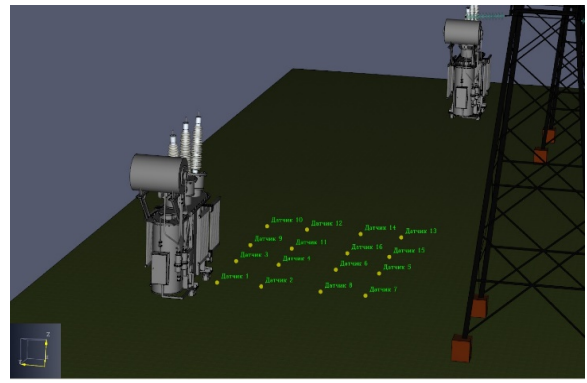
Джерело: розроблено авторами

На основі ухваленого варіанта вибору пожежної навантаги з використанням програмного комплексу FDS побудовано комп'ютерну модель (рис. 4).





а



б

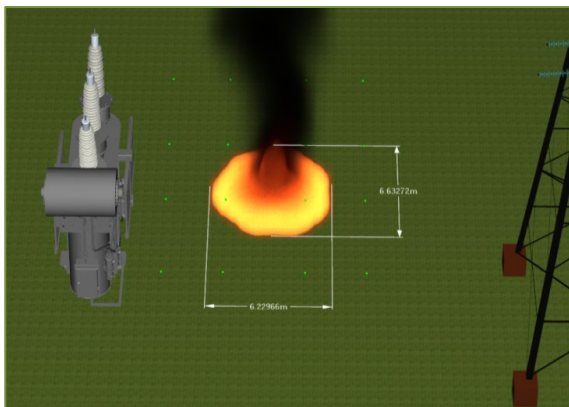
Рисунок 4 – FDS-моделювання: а – загальний вигляд комп’ютерної моделі; б – схема розміщення термодатчиків Д1–Д16 для вимірювання температури на комп’ютерній моделі

*Джерело: розроблено авторами*

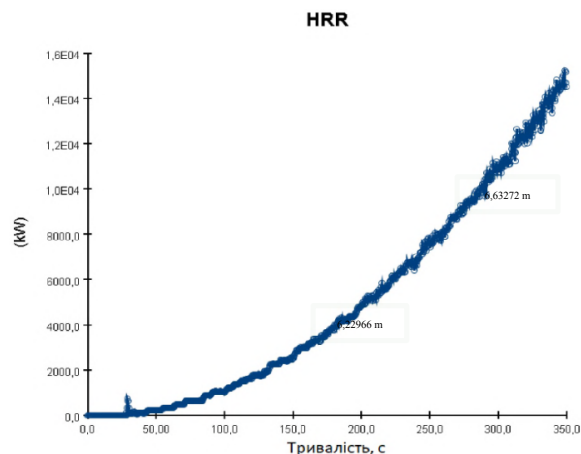
Відповідно до ухваленого сценарію під час виконання технічних робіт на типовій ділянці території ВРУ 750 кВ виникло розлиття на ґрунт 3 л бензину марки А-95, швидкість поширення полум’я 0,059 м/с, що відповідає рекомендаціям моделювання FDS [17], питома теплоємність тепловиділення 350 кВт/м<sup>2</sup> з подальшим його займанням. Обґрунтування вибору території ВРУ 750 кВ зумовлено її розмірами та найбільшими відстанями від пожежних щитів до будь-якої точки технологічної ділянки, де розташоване оливонаповнене та пожежонебезпечне обладнання.

Для контролю температурного режиму та визначення температурних розподілів у зоні пожежі на рівні ґрунту встановлено вимірювачі в газовому середовищі, схему розміщення яких наведено на рис. 4б.

За результатом проведеного моделювання визначено, що розрахункова площа можливої пожежі в разі розлиття 3 л бензину з подальшим його займанням та вільним поширенням вогню через можливість займання сухої трави може становити близько 42 м<sup>2</sup> (рис. 5).



а



б

Рисунок 5 – Результат FDS-моделювання: а – візуалізація площі поширення пожежі, б – графік розвитку інтенсивності тепловиділення вогнища пожежі з часом

*Джерело: розроблено авторами*

Окрім цього, схеми розміщення пожежних щитів доцільно уточнити з урахуванням забезпечення зменшення відстані від найвіддаленішої точки

розміщення осередку пожежі до пожежного щита з 160 м до 130 м.

На основі виконаних розрахунків та проведеного комп’ютерного моделювання

запропоновано орієнтовну схему розміщення пожежних щитів на території ВРУ 330 кВ АЕС (рис. 6).

Враховуючи велику площу території, на якій перебуває електрообладнання ВРУ 330 кВ АЕС, фактичну неможливість проведення гасіння електрообладнання за допомогою первинних засобів пожежогасіння, тому що воно розміщено на висоті, доцільно передбачити первинні засоби пожежогасіння саме в тих місцях, в яких їх можна використати, з розрахунку, що відстань від

найвіддаленішої точки розміщення оливонаповненого обладнання до пожежного щита повинна становити не менше 130 м, але в кількості не менше чотирьох пожежних щитів (додатково 2 ПЩ від наявних) з такою комплектацією кожного:

- вогнегасники – 3 од.,
- ящик з піском – 1 од.,
- протипожежне покривало – 1 од.,
- багор або гак – 1 од.,
- лопата – 2 од.

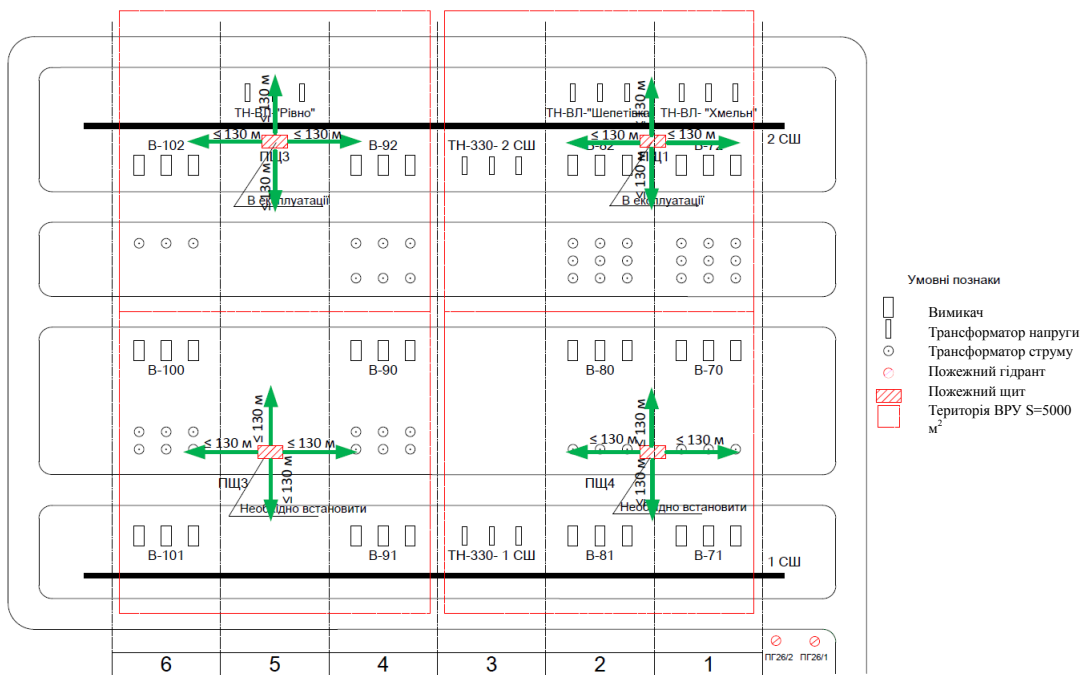


Рисунок 6 – Орієнтовна схема розміщення пожежних щитів на території ВРУ 330 кВ АЕС

Джерело: розроблено авторами

Аналогічно території ВРУ 330 кВ АЕС оснащення первинними засобами пожежогасіння території ВРУ 750 кВ АЕС необхідно здійснювати, враховуючи особливості її території.

Орієнтовна схема розміщення пожежних щитів на території ВРУ 750 кВ АЕС наведена на рис. 7.

Зі схеми, наведеної на рис. 7, видно, що на території ВРУ 750 кВ необхідно передбачити додатково до наявних ще 2 ПЩ, тобто загальна кількість має бути  $\geq 9$  ПЩ з комплектацією:

- вогнегасники – 3 од.,
- ящик з піском – 1 од.,

- протипожежне покривало – 1 од.,
- багор або гак – 1 од.,
- лопата – 2 од.

Варто зазначити, що під час застосування на практиці запропонованого принципу розташування пожежних щитів на території ВРУ 750/330 кВ АЕС обов'язковою умовою є зазначення у внутрішніх виробничих документах такої вимоги: у разі проведення будь-яких робіт на територіях ВРУ 330/750 кВ обслуговуючий персонал повинен мати не менше трьох вогнегасників з масою заряду вогнегасної речовини не менше п'яти кілограмів.

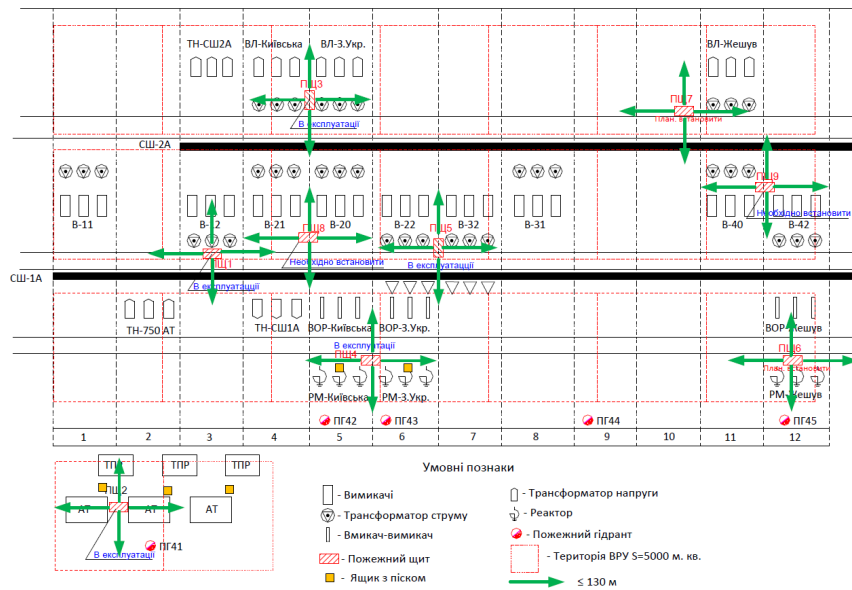


Рисунок 7 – Орієнтовна схема розміщення пожежних щитів на території ВРУ 750 кВ АЕС

Джерело: розроблено авторами

## Висновки та напрями подальших досліджень.

1. Проведений аналіз статистичних даних щодо пожеж показав зростаючу тенденцію до їх виникнення на трансформаторних підстанціях, в електророзподільних пунктах. Водночас встановлено, що повноцінних статистичних даних щодо виникнення пожеж на відкритих розподільних установках ВРУ 750/330 кВ немає. За наявними даними, щороку на територіях ВРУ фіксується від п'яти до семи пожеж, в тому числі пов'язаних із займанням трав'яного настилу. Це створює передумови щодо можливості зміни підходів до реагування на пожежі за допомогою первинних засобів пожежогасіння.

2. На основі проведеного дослідження пожежної навантаги, інженерних систем території ВРУ 750/330 кВ АЕС встановлено її фактичний протипожежний стан.

3. Унаслідок проведеного аналізу наявних нормативних документів не виявлені вимоги стосовно оснащення території ВРУ щодо кількості пожежних щитів та первинних засобів пожежогасіння залежно від специфічної пожежної небезпеки таких об'єктів.

4. На основі проведеного системного аналізу з використанням трьох альтернативних рішень здійснено вибір найбільш раціонального залежно від встановлених критеріїв оцінки.

5. На основі проведеного комп'ютерного моделювання обґрунтовано площу пожежі трав'яного настилу 42 м<sup>2</sup> на території ВРУ, яка може розвинути до моменту застосування первинного засобу пожежогасіння. Також встановлено, що для ефективного гасіння осередку пожежі відстань від найвіддаленішої точки осередку пожежі до пожежного щита повинна бути не більше 130 м.

6. На основі проведених досліджень встановлено, що для забезпечення пожежної безпеки території ВРУ 330 кВ потрібно передбачити не менше чотирьох пожежних щитів, а для ВРУ 750 кВ – не менше дев'яти. Запропоновано орієнтовну схему їх розміщення.

З огляду на загрози та небезпеки територій ВРУ 330/750 кВ АЕС запропоновано необхідну комплектацію пожежних щитів саме тими засобами, які можуть бути використані під час виникнення пожежі.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Жаворонков І. С., Люшонок А. В. Забезпечення пожежної безпеки електростанцій. *Вісник Університету цивільного захисту*. 2018. № 3. С. 343–350.
2. Токмачов Г. В. Ймовірнісний аналіз безпеки для пожеж на АЕС Куданкулам в Індії. *Безпека атомної енергетики* : зб. матеріалів міжнар. конф. з надійності, безпеки та ризику 2005 : матеріали міжнар. наук.-практ. конф. Мумбай : Індія, 2005. С. 375–380.
3. Vinod G. Insights from fire PSA for enhancing NPP safety. *Nuclear Engineering and Design*. 2008. № 238. P. 2359–2368.
4. Asamoah M. Historical review of fire safety at NPP and application of fire PSA to Westinghouse PWR NPP in the frame of risk-informed decision making : *Universitat politecnica de catalunya barcelonatech*. 2018. P. 231.
5. McGrattan K. Fire Dynamics Simulator User's Guide. *National Institute of Standards and Technology Gaithersburg*. Maryland, USA. 2013. № 6. P. 288.
6. Про забезпечення ведення обліку пожеж та їх наслідків : затв. наказом ДСНС України від 16 серп. 2017. № 445. С. 3–15.
7. Кодекс цивільного захисту України : Закон України від 02 жовт. 2012 р. *Голос України*. 2012. 20 листоп. С. 33–84.
8. Safety of Nuclear Power Plants: Design, Specific Safety : Requirements No. SSR-2/1. Vienna. IAEA. 2012. P. 91.
9. Правила улаштування електроустановок : затв. наказом М-ва енергетики та вугільної промисловості України від 21 липня 2017. № 476. *Урядовий кур'єр*. 2017. 01 серп. С. 13–37.
10. Інструкція щодо застосування вогнезахисних покриттів для кабелів у кабельних спорудах : затв. наказом М-ва палива та енергетики України від 01 квітня 2005. № 139. *Відомості Міністерства палива та енергетики України*. 2005. № 4. 10 квіт. С. 21–42.
11. Правила будови електроустановок. Пожежна безпека електроустановок. Інструкція : затв. наказом М-ва енергетики та вугільної промисловості України від 21 жовт. 2013. №756. *Відомості Міністерства палива та енергетики України*. 2013. 30 жовт. С. 15–62.
12. Про затвердження Інструкції з гасіння пожеж на енергетичних об'єктах України : затв. наказом М-ва енергетики та вугільної промисловості України від 22 груд. 2011. № 863. *Офіційний вісник України*. 2012. № 4. 23 січ. С. 6–33.
13. Протипожежні норми проектування атомних електростанцій з водо-водяними енергетичними реакторами : затв. наказом М-ва палива та енергетики України від 05 квіт. 2002. № 208. *Відомості Міністерства палива та енергетики України*. 2002. 10 травня. С. 22–26.
14. Про затвердження Правил пожежної безпеки в компаніях, на підприємствах та в організаціях енергетичної галузі України : затв. наказом М-ва енергетики та вугільної промисловості України від 26 вер. 2018. № 491. *Офіційний вісник України*. 2019. № 30. 19 квіт. С. 11–32.
15. Правила пожежної безпеки при експлуатації атомних станцій : затв. наказом М-ва палива та енергетики України від 30 травня 2007. № 256. *Офіційний вісник України*. 2007. 21 вересня. С. 8–28.
16. Правила пожежної безпеки в Україні : затв. наказом М-ва внутрішніх справ України від 30 грудня 2014. №1417. *Офіційний вісник України*. 2015. 10 квітня. С. 9–21.
17. Говаленков С.В. Методичні рекомендації до самостійної роботи з дисципліни : Системний аналіз і теорія прийняття рішень. Харків : МАУП, 2015. 12 с.
18. McGrattan K. Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide : Mathematical model NIST Special Publication 1018-5. National Institute of Standards and Technology Gaithersburg. Maryland, USA. 2007. Vol. 1. № 5. P. 100.

## REFERENCES

1. Zhavoronkov, Y. S., Yliushonok A. V. (2018). Zabezpechennia pozhezhnoi bezpeky elektrostantsii [Ensuring fire safety of power plants]. *Visnyk Universytetu tsyvilnoho zakhystu*, 3, 343-350 [in Ukrainian].
2. Tokmachev, H. V. (2005). Ymovimosnyi analiz bezpeky dlia pozhezh na AES Kudankulam v Indii [Probabilistic Safety Analysis for Fires at Kudankulam Nuclear Power Plant in India], *Materialy Mizhnarodnoi naukovo - praktychnoi konferentsii z nadiinoshti, bezpechnosti i ryzykiv Bezpeka atomnoi enerhetyky* [collection of materials International conf. on reliability, safety and risk], Mumbai [in Ukrainian].
3. Vinod, G. (2008). Insights from fire PSA for enhancing NPP safety. *Nuclear Engineering and Design*, 238, 2359–2368 [in English].
4. Asamoah, M. (2018). Historical review of fire safety at NPP and application of fire PSA to Westinghouse PWR NPP in the frame of risk-informed decision making. *Universitat politecnica de catalunya barcelonatech*, 231 [in English].
5. McGrattan, K. (2013). Fire Dynamics Simulator User's Guide, *National Institute of Standards and Technology Gaithersburg*, 6, 288 [in English].
6. Order of the State Emergency Service of Ukraine on ensuring record keeping of fires and their consequences August 16 2017, № 445. (2017, August 16). pp. 3-15 [in Ukrainian].
7. Code of Civil Protection of Ukraine October 02 2012, № 5403-VI. (2012, November 20). *Holos Ukrainy*, pp. 33-84 [in Ukrainian].
8. Safety of nuclear power plants. Designing February 13 2012, № SSR - 2/1, 91. Retrieved from <https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1715web-46541668.pdf> [in English].
9. Rules for arranging electrical installations July 21 2017, № 476. (2017, Sept. 01). *Uriadovyi Kurier*, pp. 13-37 [in Ukrainian].
10. Instructions for the use of fire-resistant coatings for cables in cable structures April 01 2005, № 139. (2005, April 10). *Vidomosti Ministerstva palyva ta enerhetyky Ukrainy*, pp. 21-42 [in Ukrainian].
11. Rules for the construction of electrical installations. Fire safety of electrical installations. Instruction October 21 2013, № 756. (2013, October 21). *Vidomosti Ministerstva palyva ta enerhetyky Ukrainy*, pp. 15-62 [in Ukrainian].
12. On the approval of the Instructions for extinguishing fires at energy facilities of Ukraine December 22 2011, № 863. (2012, January 23). *Ofitsiynyi visnyk Ukrainy*, pp. 6-33. [in Ukrainian].

13. Fire protection standards for the design of nuclear power plants with water-water power reactors April 05 2002, № 208. (2002, May 10). *Vidomosti Ministerstva palyva ta enerhetyky Ukrainy*, pp. 22-26. [in Ukrainian].
14. On the approval of the Fire Safety Rules in companies, enterprises and organizations of the energy sector of Ukraine September 26 2018, № 491. (2019, April 19). *Ofitsiyni visnyk Ukrainy*, pp. 11-32. [in Ukrainian].
15. Rules of fire safety during the operation of nuclear power plants May 30 2007, № 256. (2007, September 21). *Ofitsiyni visnyk Ukrainy*, pp. 8-28. [in Ukrainian].
16. Fire safety rules in Ukraine December 30 2014, № 1417. (2015, April 10). *Ofitsiyni visnyk Ukrainy*, pp. 9-21. [in Ukrainian].
17. Hovalenkov, S. V. (2015). *Metodychni rekomendatsii do samostiinoi roboty z dystsypliny Systemnyi analiz i teoriia pryiniattia rishen* [Methodological recommendations for independent work in the discipline System analysis and decision-making theory]. *Naukovi pratsi MAUP*, 3, 12. [in Ukrainian].
18. McGrattan, K. (2007). *Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. Mathematical model NIST Special Publication, National Institute of Standards and Technology Gaithersburg 1(5), 100* [in English]

## JUSTIFICATION OF THE EQUIPMENT OF THE 750/330 KV VRU TERRITORY OF VP KHAES WITH PRIMARY FIRE EXTINGUISHING EQUIPMENT

*Yu. Feshchuk, S. Holikova, O. Zhikharev, A. Tsyhankov*

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

---

### KEYWORDS:

primary means of fire extinguishing, fire shield, territory of the VRU 750/330 kV NPP, fire load, system analysis, modeling of fire centers.

### ANNOTATION

The growing trend of fires at electric power facilities, including open distribution facilities (PLAs), creates the basis for taking measures for their prevention and prompt response, including with the help of primary fire extinguishing means. Currently, the Fire Safety Rules in Ukraine provide for the installation of fire shields on the territory of objects with an area of more than 200 m<sup>2</sup> at the rate of one shield (stand) per 5,000 m<sup>2</sup> of protected area. However, this requirement does not take into account the specifics of the territory protected by such fire shields and the expediency of using the means they are equipped with in the conditions of intended use. The purpose of this work is to determine the required number and type of primary fire extinguishing means to ensure fire safety of the territory of the VRU 750/330 kV NPP. On the basis of the conducted research of the available fire load, engineering systems of the territory of the VRU 750/330 kV NPP, its fire prevention condition was established. The analysis of the existing normative documents showed that there are no requirements for equipping the territory of the VRU with fire shields and their equipment with primary fire extinguishing means, depending on the specific fire hazard of such objects. On the basis of a system analysis using three alternative solutions, the most rational choice was made, depending on the established assessment criteria, namely: the installation of fire panels equipped with exactly those means that can be applied, taking into account the peculiarities of their location on the territory of the VRU 750/330 kV NPP in fire-hazardous places. Based on the results of computer modeling, the area of the fire on the territory of the VRU, which can develop before the use of the primary fire extinguishing agent, as well as the maximum distance from the fire shield to the center of the fire, is substantiated. It has been established that to ensure fire safety of the territory of the 330 kV VRU, at least 4 fire shields should be provided and an approximate scheme of their placement is proposed, and for the territory of the 750 kV VRU, it is necessary to provide at least 9 fire shields with an approximate scheme of their placement. Based on the threat and danger of the territories of the VRU 330/750 kV NPP, it is proposed to equip the fire shields with exactly those means that can be used in the event of a fire.

---

УДК 351.861

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ЗРОШУВАЧІВ ДЛЯ ПРОТИПОЖЕЖНИХ ВОДЯНИХ ЗАВІС

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1.66-74>

Бенедюк В. С.<sup>1\*</sup>, ORCID iD 0000-0002-5109-5295

Стилик І. Г.<sup>1</sup>, ORCID iD 0000-0002-8474-2014

Тимошенко О. М.<sup>1</sup>, ORCID iD 0000-0001-7568-5030

Онищук А. Є.<sup>1</sup>, ORCID iD 0000-0002-1829-126X

Маладика Л. В.<sup>2</sup>, ORCID iD 0000-0003-1644-0812

\*E-mail: [naanotek@ukr.net](mailto:naanotek@ukr.net)

<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:

27.03.2023

Пройшла

рецензування:

12.04.2023

### КЛЮЧОВІ СЛОВА:

пожежа, протипожежна водяна завіса, горизонтальний зрошувач, карта розподілу води зі зрошувача, інтенсивність зрошування, екранувальна здатність, протипожежний захист скляних фасадів будівель.

### АНОТАЦІЯ

Наведено результати аналізу публікацій щодо досліджень водяних завіс. Попередньо визначено, що відомі горизонтальні зрошувачі, які призначені насамперед для стандартного горизонтального настінного монтажу для гасіння пожеж на площі підлоги, у разі нестандартного вертикального положення, розеткою вниз, можуть бути використані для створення водяних завіс. Але аналіз технічних характеристик зрошувачів такого типу від різних виробників показав, що наведені паспортні дані щодо розподілу води зі зрошувачів навіть для горизонтального положення, мають наближені, орієнтовні траєкторії потоків та моделі зрошування. Для вертикальної орієнтації цих зрошувачів таких даних взагалі немає. У ДСТУ EN 12259-1:2019 передбачена методика випробувань горизонтальних зрошувачів на розподіл води на площі підлоги та змочування стін тільки для їхнього горизонтального положення. З огляду на це експериментальні дослідження наведених зрошувачів для водяних завіс виконувались за розробленою робочою методикою випробувань, на прикладі одиночного горизонтального спринклера, яка передбачає визначення такої його орієнтації (горизонтальної чи вертикальної), за якої досягається найбільш ефективний захист від пожежі віконного прорізу заданого розміру. Критеріями оцінки були: отримані величини інтенсивності розподілу води на горизонтальній площі, розміри цієї площі та її межі щодо зрошувача та вікна. За результатами проведених досліджень визначено інтенсивності розподілу води на горизонтальній поверхні та побудовані 3D моделі інтенсивності розпилування води зі зрошувача відносно його розташування до вікна. Дослідження показали, що найбільш ефективний захист віконного прорізу може бути досягнутий за нестандартної – вертикальної орієнтації зрошувача. Тобто підтверджена можливість більш ефективного застосування зрошувачів указанного типу для створення водяних завіс. Але зазначене потребує подальших досліджень, в тому числі з визначення та оцінки фактичної екранувальної здатності такої завіси від проникнення небезпечних факторів пожежі, зокрема теплового потоку.

**Постановка проблеми.** Для запобігання поширенню пожежі та її небезпечних факторів із приміщень або пожежних відсіків в інші приміщення,



зокрема, передбачено створення конструктивних протипожежних перешкод. Протипожежна перешкода згідно з [1] – це будівельна конструкція, інженерна споруда або технічний засіб, що має нормовану межу вогнестійкості та перешкоджає поширенню пожежі. У наведеному документі та в інших чинних в Україні нормативних актах визначені поняття щодо: сутності, умов використання, кількісних параметрів та інших способів та засобів нерозповсюдження і запобігання розвитку пожежі, одним із яких є протипожежна завіса. Аналіз джерел інформації, приклади яких наведені нижче, показує, що не всі проблеми щодо застосування одного із видів протипожежних завіс, а саме – протипожежних водяних завіс, на сьогодні теоретично та практично вирішені. Ця публікація присвячена дослідженням ефективності застосування у системах створення водяних завіс одного із типів водяних пожежних зрошувачів, а саме – горизонтальних зрошувачів, для протипожежного захисту прорізів вікон у конструкції будівель та споруд, зважаючи на те, що віконні та інші прорізи, наприклад, технологічні в будівельних протипожежних перешкодах, є найбільш незахищеними щодо небезпеки поширення пожежі та її небезпечних факторів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У матеріалах [2] наводиться, що з метою зменшення проникнення небезпечних факторів пожежі через прорізи в стінах приміщень необхідно застосовувати водяні протипожежні завіси, а окремі ділянки на великих відкритих площах у будівлях також можуть бути захищені водяними завісами. На основі натурних випробувань встановлено, що оптична щільність газового середовища (густина диму) у відгородженому водяною завісою приміщенні значно менша, ніж у приміщенні, в якому відбувається пожежа. Таким чином, підтверджено, що водяні завіси можуть бути використані для перешкодження поширенню пожежі та її небезпечних факторів.

У статті [3] також наведено результати досліджень водяних завіс як захисту від поширення теплового потоку та диму. Випробовування проводились таким чином, що водяна завіса утворювала водяний бар'єр між джерелом тепла та диму і приміщенням, що захищається. Випробування показали, що залежно від пожежної навантаги пожежі та характеристик водяної завіси показник її екранувальної здатності від проникнення теплового потоку може становити від 17% до 85%. Повідомляється про проведення подальших досліджень водяних завіс із зазначеного напрямку.

У матеріалах [4] наведено результати досліджень водяних завіс для протипожежного захисту транспортних тунелів. Основна мета роботи – визначення числових показників екранувальної здатності водяних завіс від проникнення теплового потоку та диму. Досліджено ефективність водяних завіс за різних умов навколишнього середовища та характеристик завіси. Завдяки проведенню випробувань встановлено, що, наприклад, показник екранувальної здатності від проникнення диму крізь завісу може становити 40–75% залежно від тиску в мережі системи подавання води та кількості й технічних характеристик розпилювачів завіси. Стверджується, що водяні завіси є одним із способів захисту від проникнення небезпечних факторів пожежі в тунелях, але ці дані надалі потребують поглиблених досліджень.

Останнім часом у дизайні будівельної архітектури набуло широкого застосування скління великих за площею фасадів будівель. Забезпечення протипожежного захисту таких конструкцій від впливу вогню та високих температур є складною проблемою, що суттєво обмежує перспективні розробки архітекторів. У багатьох країнах світу для вирішення цієї проблеми використовують водяні завіси, які створюють або перед скляними елементами, або застосовують безпосередньо для зрошення конструкцій. Так, наприклад, водяні завіси, створені із застосуванням спринклерів відомої

компанії «Tyco Fire Protection Products», здатні захистити засклені конструкції без будь-яких ознак пошкодження протягом двогодинного вогневого впливу, що підтверджено випробуваннями за методиками ASTM E119 [5]. Такими системами протипожежного захисту обладнана, зокрема, будівля «Gas Natural» у Барселоні, яка визнана у всьому світі архітектурним шедевром.

Наведені у [6–7] результати теоретичних та експериментальних досліджень протипожежних водяних завіс для запобігання поширенню (блокуванню) пожежі та її небезпечних чинників усередині захищуваних приміщень, запобігання поширенню пожежі через прорізи в огорожувальних конструкціях будинків і споруд та охолодження технологічного обладнання, що отримані протягом останніх років в ІДУ НД ЦЗ також підтверджують актуальність та перспективи застосування водяних завіс.

**Формулювання цілей дослідження.** Метою було визначення положення орієнтації в просторі (горизонтально чи вертикально) одиночного горизонтального спринклера типу V2710 виробництва фірми «Vistaulic» (Бельгія), за якої досягається найбільш ефективний захист від пожежі віконного прорізу, заданих геометричних розмірів.

**Методи дослідження.** Дослідження проводились за методами, наведеними у Методиці УкрНДПБ МНС України № 92-2007 «Випробування з визначення розподілу води спринклерних та дренчерних зрошувачів автоматичних установок водяного пожежогасіння» на стенді для випробувань з визначення розподілу води ВРВ-04.000 ПС.

Для побудови та подальшого порівняння 3D моделей інтенсивності розподілу води, що формуються зрошувачем за його горизонтальної та

вертикальної орієнтації в просторі, визначали рівномірність розподілу води на горизонтальній поверхні щодо трьох значень робочого тиску (2, 5, 8 бар).

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Відомі горизонтальні спринклери, зокрема типу V2710 [8], що досліджувались у роботі, результати якої наводяться у цій статті, – це зрошувачі з формою розпилювання як віялоподібний потік води. Загальний вид горизонтального спринклера типу V2710 наведено на рис. 1.



Рисунок 1 – Загальний вид горизонтального спринклера типу V2710  
Джерело: [8]

Ці зрошувачі призначені насамперед для стандартного горизонтального настінного монтажу, коли потік води, що спрямовується вперед і вниз як розкрите віяло, ефективний під час гасіння пожеж, наприклад на площі підлоги. За нестандартного вертикального положення, розеткою вниз та під кутом до горизонталі, зрошувачі можуть бути використані для створення водяних завіс. Зрошувач типу V2710 має діаметр умовного перерізу 15 мм (Du15) та розрахований на робочий тиск (0,48–12,50) бар.

На рис. 2 наведено карти зрошування зрошувачем типу V2710 у горизонтальній та вертикальній площинах за стандартної – горизонтальної його орієнтації в просторі, для трьох значень робочого тиску – (48; 103; 207) кПа, (0,48; 1,03; 2,07) бар.



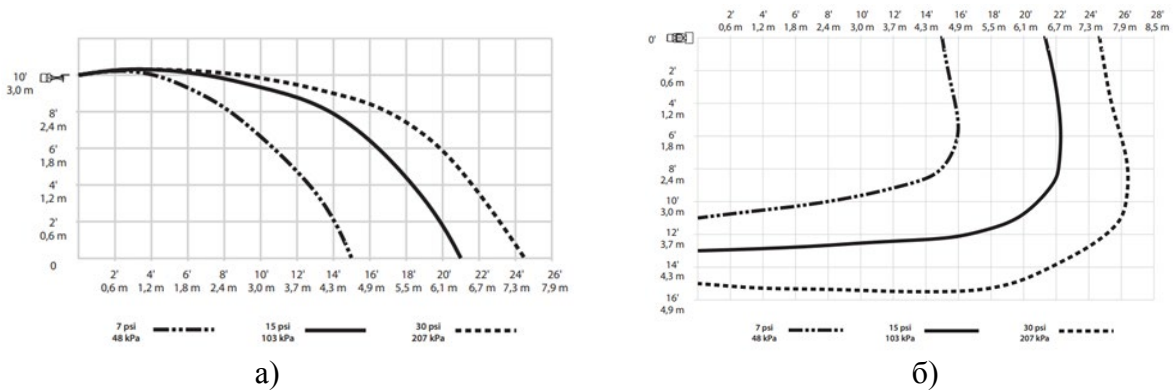


Рисунок 2 – Карти зрошування зрошувачем типу V 2710: а) – у вертикальній та б) – у горизонтальній площинах за його горизонтальної орієнтації у просторі

Джерело: [8]

У зв'язку з тим, що подібних карт зрошування для вертикальної орієнтації в просторі в технічному описі цього зрошувача немає, для досягнення поставленої мети, зокрема для інших значень робочого тиску, необхідно було провести відповідні експериментальні дослідження, основні результати яких наведені у цій статті.

Під час проведення досліджень використовувалось таке випробувальне

обладнання: стенд для випробувань з визначення розподілу води ВРВ-04.000.ПС, програмно-технічний комплекс «Автоматизована система управління стендом для випробувань з визначення розподілу води».

Загальний вид випробувального стенда та його основних вузлів наведено на рис. 3.

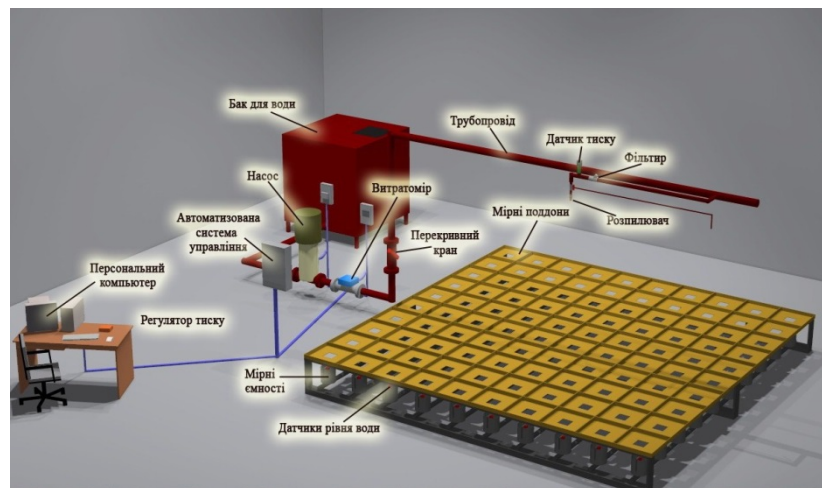


Рисунок 3– Загальний вид випробувального стенда та його основних вузлів

Джерело: розробка авторів

Електронна система управління роботою водяного насоса стенда забезпечує подавання води з плавною характеристикою регулювання витрати, а також вимірювання величини цієї витрати у необхідному діапазоні.

Схеми розташування зрошувача за вертикальної та горизонтальної його орієнтації в просторі відносно вікна наведені на рис. 4.

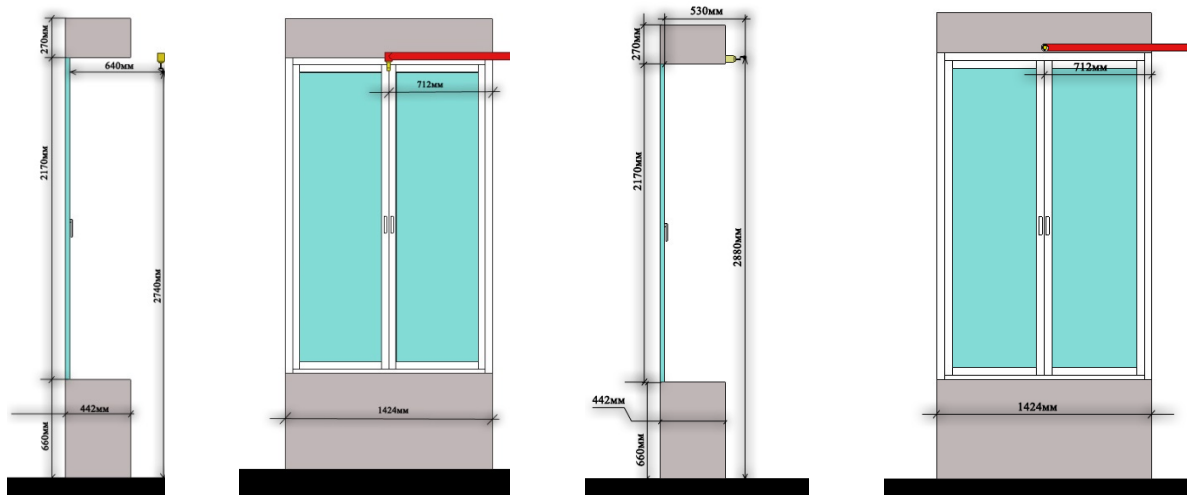


Рисунок 4 – Схема розташування зрошувача за вертикальної та горизонтальної орієнтації в просторі відносно вікна

Джерело: розробка авторів

Схема розташування зрошувача на випробувальному стенді за горизонтальної та вертикальної його орієнтації у просторі наведена на рис. 5.

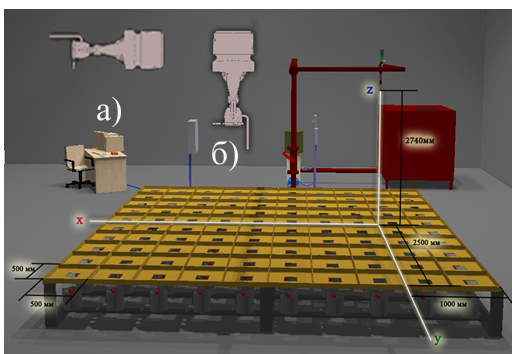


Рисунок 5 – Схема розташування зрошувача на випробувальному стенді за горизонтальної а) та вертикальної б) його орієнтації у просторі

Джерело: розробка авторів

Під час дослідження робочий тиск води зі зрошувача контролювався за

допомогою вимірювального комплексу, до складу якого входять: датчик тиску типу SEN (від 0 до 16 бар), персональний комп'ютер із програмним забезпеченням «Вимірювальний комплекс». Об'єм води, розподіленої в межах поверхні зрошуваної зрошувачем, та тривалість збирання води вимірювали за допомогою програмно-технічного комплексу «Автоматизована система управління стендом для випробувань з визначення розподілу води ВРВ-04.000.ПС».

Дослідження з визначення розподілу води на горизонтальній поверхні зі зрошувача проводились за трьох значень робочого тиску: (2, 5, 8 бар) з тривалістю подавання води зі зрошувача протягом 10 хв.

Значення розподілу води зі зрошувача на горизонтальній площі за горизонтальної та вертикальної його орієнтації та робочого тиску 8 бар наведені на рис. 6–7.

Ряд	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0	2,0	1,6	1,4	1,2	0,0	0,0	0,0
3	0,0	1,1	2,6	6,0	4,7	4,2	3,8	1,7	0,0	0,0
4	0,0	2,1	2,7	7,9	5,1	7,9	6,1	23,7	0,0	0,0
5	0,0	1,6	3,4	8,1	7,0	7,3	6,3	1,8	0,0	0,0
6	0,0	1,5	3,4	9,3	9,1	8,9	6,3	1,6	0,3	0,0
7	0,0	1,9	4,6	10,2	12,0	13,4	8,0	2,4	0,9	0,0
8	0,0	2,3	5,6	10,6	15,7	23,2	12,1	3,9	1,1	0,0
9	0,0	2,5	5,9	12,0	14,8	20,8	18,8	5,5	2,0	0,7
110	0,9	2,1	5,3	12,1	16,8	15,1	18,7	5,6	2,5	1,4

Інтенсивність зрошення кожної ділянки стенда – мм/хв.  
Витрата води зі зрошувача – 210 л/хв.  
● - Місце розташування зрошувача.

Рисунок 6 – Розподіл води на горизонтальній площі зі зрошувача за горизонтальної його орієнтації у просторі

Джерело: розробка авторів

Ряд	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	19,6	16,7	5,5	5,1	57,2	0,0	0,0	0,0
3	0,0	1,8	19,0	92,8	99,4	93,0	99,9	18,7	1,7	0,0
4	0,0	1,5	17,0	20,8	37,3	55,5	51,8	99,2	1,4	0,0
5	0,0	1,5	2,2	3,4	6,6	22,0	30,0	1,7	0,0	0,0
6	0,0	1,5	3,1	99,7	8,8	12,2	4,0	1,1	0,0	0,0
7	0,0	1,1	1,9	91,3	4,1	3,2	1,3	0,8	0,0	0,0
8	0,0	0,0	0,6	1,3	1,7	1,1	0,4	0,0	0,0	0,0
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Одиниці виміру інтенсивності зрошення на кожній ділянці – мм/хв.  
Витрата води через зрошувач – 210л/хв.  
● - Місце розташування зрошувача

Рисунок 7 – Розподіл води на горизонтальній площі зі зрошувача за вертикальної його орієнтації у просторі

Джерело: розробка авторів

Загальний вид форми розпилювання води зі зрошувача за горизонтальної його орієнтації в просторі та робочого тиску 8 бар наведено на рис. 8.



а



б

Рисунок 8 – Загальний вид форми розпилювання води зі зрошувача за горизонтальної його орієнтації у просторі та робочого тиску 8 бар: а) – вид спереду; б) – вид збоку

Джерело: розробка авторів

Загальний вид форми розпилювання води зі зрошувача за вертикальної його орієнтації в просторі та робочого тиску 8 бар наведено на рис. 9.



Рисунок 9 – Загальний вид форми розпилювання води зі зрошувача за вертикальної його орієнтації у просторі та робочого тиску 8 бар: а) – вид спереду; б) – вид збоку

Джерело: розробка авторів

Відповідно до отриманих даних щодо розподілу води зі зрошувача на горизонтальній поверхні та інтенсивності розподілу води за значення тиску 8 бар у двох положеннях його орієнтації змодельовані 3D моделі розташування зрошувача у просторі відносно вікна, із заданими геометричними розмірами, та

інтенсивності розподілу води зі зрошувача на горизонтальній поверхні, що наведено на рис. 10–11, які наочно демонструють перевагу вертикальної орієнтації зрошувача у просторі перед горизонтальною під час захисту віконного прорізу від поширення пожежі.

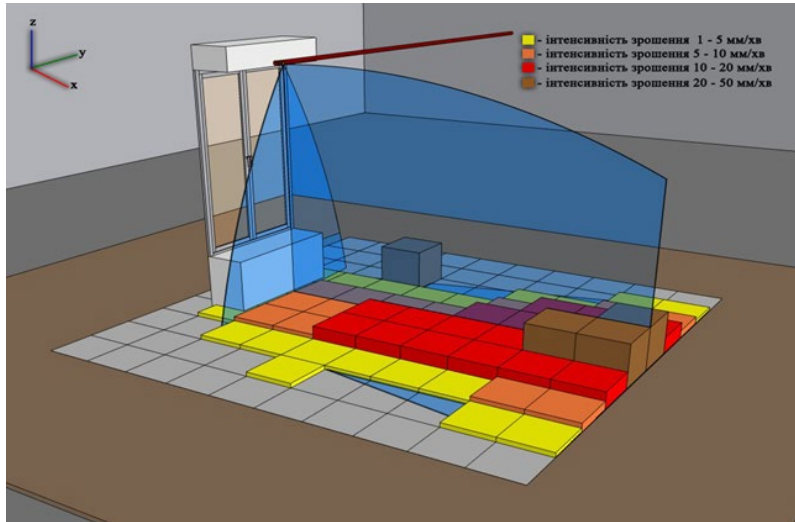


Рисунок 10 – 3D модель інтенсивності розподілу води зі зрошувача на горизонтальній поверхні за горизонтальної його орієнтації у просторі та значення тиску 8 бар

Джерело: розробка авторів

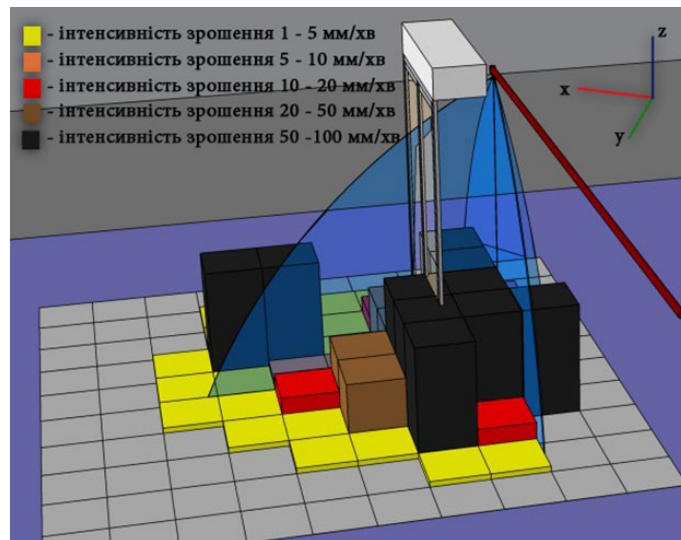


Рисунок 11 – 3D модель інтенсивності розподілу води зі зрошувача на горизонтальній поверхні за вертикальної його орієнтації у просторі та значення тиску 8 бар

Джерело: розробка авторів

### Висновки та напрями подальших досліджень.

1. Орієнтовні форми розпилювання води зі зрошувача в проекції на площу

віконного прорізу незалежно від орієнтації зрошувача в просторі та значень робочого тиску, які досліджувались, перекривають площу віконного прорізу на (90–95) %.

2. Основний розподіл води зі зрошувача на горизонтальній поверхні за стандартної – горизонтальної його орієнтації, випускним отвором уперед (інтенсивність подавання води (10–20) мм/хв), відбувається на площі умовного кола з орієнтовним діаметром (2–3) м, центр якого віддалений орієнтовно на (3,5–5,0) м від торця зрошувача вздовж його поздовжньої осі (залежно від значення тиску). Водночас частина розпиленої води виходила за межі випробувального стенду.

3. Найбільш ефективний захист віконного прорізу розміром (2170 × 1420) мм від небезпечних факторів пожежі може бути досягнутий у разі застосування зрошувача у нестандартній – вертикальній його орієнтації у просторі, випускним отвором униз. Дослідження показали, що основний розподіл води з

інтенсивністю подавання (60–100) мм/хв відбувається в межах площі умовного еліпса з орієнтовною довжиною його осей симетрії: більшої – (2–3) м і меншої – (1,0–1,5) м (залежно від значення тиску). Водночас центр симетрії еліпса практично збігається із поздовжньою віссю зрошувача, а більша вісь симетрії еліпса орієнтовно паралельна площині вікна та лежить безпосередньо перед віконним прорізом, що захищається.

4. Надалі отримані результати потребують досліджень, зокрема з визначення та оцінки фактичної екранувальної здатності такої завіси від проникнення небезпечних факторів пожежі, зокрема теплового потоку як для одиночного зрошувача, так і для декількох, розміщених один за одним в один або декілька рядів, для створення водяної завіси більшого розміру.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. [Чинний від 2017-06-01]. Київ, 2017. 35 с. (Інформація та документація).
2. Fong N.K., Chow W. K., Chan W.T. Preliminary studies on smoke spreading prevention and thermal radiation blockage by a water curtain. *International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes*. 2001. Vol. 3. № 3, P. 98–103.
3. Ponziani F. A., Tinaburri A., Ricci V., Water curtains for fire protection : Experimental tests and CFD modeling. *WIT Transactions on The Built Environment*. 2017. Vol 174, P. 97–105.
4. Yinuo Chen, Jinzhang Jia, Guangbo Che, Zhiheng Zhu , Zhiyuan Shen ,Yumo Wu, Study on smoke blocking and thermal radiation attenuation by water curtain in tunnel fire, *National Natural Science Foundation of China, Scientific Report*, 2023. P. 1–15.
5. ASTM E119-18ce1 Standard Test Methods for Fire Tests of Building. 2018. P. 37 (дата звернення : 26.08.2022).
6. 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*. 2020. № 2(10). С. 22–31.
7. Бенедюк В. С., Стилик І. Г., Тимошенко О. М., Ліхнівський Р. В., Онишук А. Є., Присяжнюк В. В. Результати лабораторних досліджень екранувальної здатності водяних завіс від проникнення небезпечних факторів пожежі. *Науковий вісник : Цивільний захист та пожежна безпека*. 2022. № 2(14). С. 52–64.
8. Спринклер стандартний горизонтальний настінний серії V2710 : вебсайт. URL : <https://avalonkiev.at.ua> > sprink V2710 (дата звернення : 17.12.2021).

### REFERENCES

1. DBN V.1.1-7:2016. Pozhezhna bezpeka ob'ektiv budivnytstva. Zahalni vymohy. [Chynnyi vid 2017-06-01].Kyiv, 2017. 35 s. (Informatsiia ta dokumentatsiia). [in Ukrainian].
2. Fong, N. K., Chow, W. K., Chan, W. T. (2001). Preliminary studies on smoke spreading prevention and thermal radiation blockage by a water curtain. *International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes*. P. 98-103. [in English]
3. Ponziani, F. A., Tinaburri, A., Ricci V., (2017). Water curtains for fire protection: Experimental tests and CFD modeling. *WIT Transactions on The Built Environment*. P. 97–105.
4. Yinuo, Chen, Jinzhang, Jia, Guangbo, Che, Zhiheng, Zhu , Zhiyuan, Shen ,Yumo, Wu, (2023). Study on smoke blocking and thermal radiation attenuation by water curtain in tunnel fire, *National Natural Science Foundation of China, Scientific Report*. 1-15. [in English]
5. ASTM E119-18ce1 Standard Test Methods for Fire Tests of Building. 2018. R. 37 (data zvernennia: 26.08.2022). [in English]
6. Benediuk, V.S., Korniienko, O.V., Melnyk, V.P., Stylyk, I.H., Tymoshenko, O.M. (2020). Shliakhy ta problemni pytannia vprovadzhennia vodianykh protypozhezhnykh zavis v Ukraini. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*. № 2(10). S. 22 –31. [in Ukrainian].
7. Benediuk, V. S., Stylyk, I. H., Tymoshenko, O. M., Likhnovskiy, R. V., Onyshchuk, A. Ie., Prysiazhniuk, V. V. (2022). Rezultaty laboratornykh doslidzhen ekranavalnoi zdatnosti vodianykh zavis vid pronyknennia nebezpechnykh faktoriv pozhezhi. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*. № 2(14). S. 52–64. [in Ukrainian].
8. Sprynkler standartnyi horyzontalnyi nastinnyi serii V2710: Retrieved from: <https://avalonkiev.at.ua> > sprink V2710 (data zvernennia: 17.12.2021). [in Ukrainian].



## EXPERIMENTAL RESEARCH OF USING HORIZONTAL IRRIGATORS FOR FIRE-PROTECTED WATER CURTAINS

V. Benediuk<sup>1</sup>, I. Stylyk<sup>1</sup>, O. Tymoshenko<sup>1</sup>, A. Onyshchuk<sup>1</sup>, L. Maladyka<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 Protection of Ukraine, Ukraine*

---

### KEYWORDS:

fire, fire-protected water curtain, horizontal irrigator, map of water distribution from irrigators, the intensity of irrigation, screening possibility, fire protection of glass building facades.

### ANNOTATION

Results of publication analysis about research of water curtains are given. Firstly, it was conducted, that, well-known horizontal irrigators of standard horizontal wall mounting for firefighting by floor area, while non-standard position, outlet down, can be used for the creation of water curtains. But analysis of irrigators' technical characteristics, from different manufacturers, shows that given passport data for water distribution of irrigators, even for horizontal position, has similar indicative trajectories of flow and irrigation models. For vertical orientation irrigators such data are absent. DSTU EN 12259-1:2019 provided methodology of horizontal irrigators testing on water distribution through floor area and wetting of walls only for their horizontal positioning. That's why experimental research of given irrigators for water curtains was conducted with using of test methodology, for example, a single horizontal irrigator, which provides its positioning (vertical or horizontal), when its fire protection characteristic for window opening of a given size is most effective. Evaluation criteria were: obtained values of intensity of water distribution on wall area, sizes of this area, and its limits relatively to irrigator and window. By results of conducted research were determined the intensities of water distribution on the horizontal surface and created 3D models of water spray intensity from the irrigator relative to its position to the window. Research showed that most effective protection of window opening can be created while non-standard – vertical orientation of irrigator. It means that, confirmed the possibility of more effective using of irrigators of given type for water curtains creation. But, all of this needs further studying, in particular, of determination and evaluation of the factual screening possibility of such curtain for penetration of dangerous factors of fire and heat flux.

УДК 614.842

## ПАРАМЕТРИ ЗАСОБІВ ДИМО- ТА ТЕПЛОВИДАЛЕННЯ, ЩО ХАРАКТЕРИЗУЮТЬ ЕФЕКТИВНІСТЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1.75-82>

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

Ніжник В. В., ORCID iD 0000-0003-3370-9027

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

Жартовський С. В. ORCID iD 0000-0001-7512-0988

\*E-mail: Prisyazhnuk1979@gmail.com

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

### ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

*Надійшла до редакції:*

01.03.2023

*Пройшла рецензування:*

30.03.2023

### КЛЮЧОВІ СЛОВА:

продуктивність, засоби димо- та тепловидалення, параметри, критерії, сценарій проведення експериментальних досліджень, кут нахилу лопаті вентилятора та площа лопаті вентилятора.

### АНОТАЦІЯ

Наведено загальну кількість пожежно-рятувальної техніки, що комплектується переносними засобами димо- та тепловидалення, а також статистику їх використання під час гасіння пожеж в Україні. Встановлено, що переважна більшість переносних засобів димо- та тепловидалення, які експлуатуються в пожежно-рятувальних підрозділах, є застарілими моделями і потребують суттєвого покращення параметрів для ефективного функціонування. Окреслено, що основним параметром, який характеризує ефективність функціонування переносних засобів димо- та тепловидалення, є продуктивність. Вона безпосередньо впливає на тривалість проведення тактичної вентиляції пожежно-рятувальними підрозділами, внаслідок чого збільшується ймовірність порятунку людей та ліквідації пожеж. Визначено параметри, що мають вплив на продуктивність вентилятора, зокрема його діаметр та число обертів, що створюють лінійну залежність між ними та продуктивністю засобу димо- та тепловидалення. За такої умови, зі збільшенням значення діаметра вентилятора та числа обертів, збільшується продуктивність засобу. Обґрунтовано перелік параметрів, що мають найбільш значущий вплив на продуктивність засобу димо- та тепловидалення, зокрема кут нахилу лопаті та площі лопаті вентилятора. Визначено, що порівняння параметра продуктивності можна здійснювати за небезпечними чинниками пожежі, такими як температура та щільність диму, видалення яких із приміщення забезпечує засіб димо- та тепловидалення. Встановлено перелік критеріїв для порівняння параметра продуктивності для удосконаленого та неудосконаленого засобу димо- та тепловидалення. Зазначені критерії будуть застосовані для оцінювання результатів експериментальних досліджень залежності продуктивності засобів димо- та тепловидалення від їх технічних характеристик. Обґрунтовано сценарії проведення подальших експериментальних досліджень засобів димо- та тепловидалення, за яких найбільш результативно можливо дослідити залежність ефективності видалення температури й диму з приміщень та будівель.

**Постановка проблеми.** Аналіз роботи оперативно-рятувальних служб країн світу вказує на високу тактичну значущість використання переносних засобів димо- та тепловидалення [1], що набули інноваційних змін [2], порівняно з вітчизняними аналогами. Такий засіб впливає на результативність проведення

робіт з рятування людей та ліквідації пожеж [3], але неефективно використовується підрозділами Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту (далі – ОРСЦЗ) ДСНС України.

На сьогодні в пожежно-рятувальних підрозділах ДСНС України експлуатується

2883 автоцистерни, 160 пожежних насосних станцій та 70 автомобілів газодимозахисної служби, що відповідно до [4] повинні оснащуватися переносними засобами димо- та тепловидалення. Так, відповідно до [4] нормативна потреба засобів складає 3183 одиниці. Всього в Україні експлуатується 471 засіб димо- та тепловидалення різних типів та виробників. Із загальної кількості засобів, що експлуатуються, 300 одиниць, такі як ДП-5 та ДПЕ-7, є застарілими моделями та мають недостатньо високі технічні характеристики для їх використання.

Статистичні дані про кількість пожеж у будівлях житлового сектору та застосування засобів димо- та тепловидалення у період з 2018 по 2022 роки наведено на рис. 1.



Рисунок 1 – Статистичні дані про кількість пожеж у будівлях житлового сектору та застосування засобів димо- та тепловидалення у період з 2018 по 2022 роки

Джерело: розроблено авторами

Такі статистичні дані підтверджують той факт, що в пожежно-рятувальних підрозділах ДСНС України здебільшого експлуатуються переносні засоби димо- та тепловидалення, що мають технічні параметри, які характеризують низьку та недостатню ефективність під час їх застосування на пожежах. Одним із таких є засіб димо- та тепловидалення ДП-5, який має низькі технічні характеристики, зокрема його продуктивність складає  $5000 \text{ м}^3/\text{год}$ .

Основним параметром, який характеризує ефективність функціонування переносних засобів димо- та тепловидалення є продуктивність [5]. Ця характеристика (параметр) безпосередньо впливає на тривалість

проведення тактичної вентиляції пожежно-рятувальними підрозділами, внаслідок чого збільшується ймовірність порятунку людей та ліквідації пожеж.

Із попередніх проведених аналітичних досліджень [6] встановлено, що на сьогодні для виконання завдань пожежно-рятувальними підрозділами щодо проведення тактичної вентиляції приміщень, будівель та споруд достатньо мати на оснащенні засіб димо- та тепловидалення, який має продуктивність не менше  $11000 \text{ м}^3/\text{год}$ . Для повного переоснащення пожежно-рятувальних підрозділів України засобами димо- та тепловидалення необхідно мати великий бюджет із розрахунку вартості одного засобу близько 300000 тис. гривень.

З огляду на зазначене спрямовані на визначення параметрів переносних засобів димо- та тепловидалення дослідження, що характеризують його ефективність функціонування з метою подальшого удосконалення таких засобів, є актуальними.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання удосконалення технічних рішень щодо покращення ефективності засобів димо- та тепловидалення досліджувались такими іноземними вченими: Paul H Wiedorn [7], Jurgen Bader [8], William L. Jackman [9], Konz Lufttechnik [10] та іншими. Їхні зусилля спрямовані на модифікацію конструктивних елементів [7] та [8] та покращення експлуатаційних характеристик цих засобів [9] та [10]. У зазначених працях більшість технічних рішень стосуються напрямку потоку повітря, що створюється лопатями вентилятора. В Україні вчені теж проводили відповідні дослідження щодо осадження продуктів горіння, зниження температури та збільшення видимості в задимлених приміщеннях. Це наведено в роботах В. Ковалишина [11], Е. Гуліди [12], В. Луца [13], Н. Штангерета [14] та інших.

Проте слід відзначити, що у вказаних працях не досліджувались питання встановлення закономірності залежності



продуктивності засобів димо- та тепловидалення від зміни їх технічних параметрів, зокрема площі та кута лопатей вентилятора.

**Формулювання цілей дослідження.** Визначити параметри засобів димо- та тепловидалення, що характеризують ефективність їх функціонування.

**Методи дослідження.** У роботі для досягнення поставленої мети використовувалися методи аналітичних досліджень, що полягають в аналізі та вивченні основних положень, закладених в основу та теорію роботи осьових вентиляторів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Продуктивність вентилятора залежить від таких основних параметрів, а саме: діаметра вентилятора, числа обертів, площі лопатів та кута атаки лопатей.

Проведено аналіз кожного із зазначених параметрів. В основу вибору переліку параметрів, щодо яких надалі досліджуватиметься їх вплив на продуктивність засобу димо- та тепловидалення, покладено значущість впливу вибраного параметра за продуктивністю засобу та економічні показники щодо виробництва, функціонування та технічного обслуговування засобу в разі зміни параметра, що розглядається.

Такі параметри, як діаметр вентилятора та число обертів, що впливають на продуктивність вентилятора, створюють лінійну залежність між такими параметрами і продуктивністю засобу димо- та тепловидалення. За такої умови, чим більше значення діаметра вентилятора та числа обертів, тим більша продуктивність засобу, водночас збільшуються економічні показники щодо виробництва, функціонування та технічного обслуговування такого засобу. Отже, покращення характеристик засобів димо- та тепловидалення завдяки збільшенню їх вартості в цій роботі визначено як недоцільне. Разом із цим зміну діаметра та числа обертів

вентилятора можливо враховувати під час проєктування та виготовлення нового вентилятора.

В осьовому вентиляторі передавання енергії потоку повітря виникає завдяки робочому колесу, що складається з консольних лопатів, які закріплені на втулці. Конструктивну схему осьового вентилятора наведено на рис. 2.

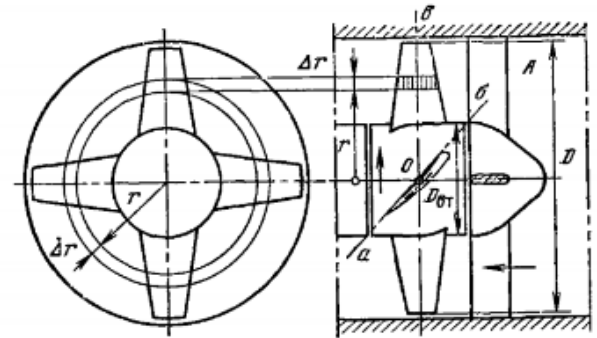


Рисунок 2 – Конструктивна схема осьового вентилятора

Оскільки колесо вентилятора під час обертання утримується в осьовому напрямку, а його лопаті закріплені під кутом до площини обертання, у такий спосіб колесо переміщує повітря вздовж осі. За цих обставин потік повітря дещо закручується. В цьому процесі важливий вплив має кут нахилу лопаті вентилятора. Дослідження впливу зміни кута нахилу лопаті вентилятора на його продуктивність не впливає на економічні показники вентилятора і пропонується для подальшого дослідження в зазначеній роботі.

Для розгляду роботи осьових вентиляторів використовують теорію решітки профілів [15]. Під час розсікання робочого колеса та розвертання поверхні з перерізом лопатей отримуємо плоску решітку профілів осьового вентилятора [15]. Плоску решітку профілів вентилятора зображено на рис. 3.

Основні величини, що характеризують геометрію решітки, такі:  $l$  – крок лопатей, який дорівнює відстані між подібними точками перерізу лопатей, що виміряні в напрямку руху решітки;  $b$  – довжина хорди перерізу лопаті;  $B$  – ширина решітки (розмір паралельної вісі обертання);  $\beta_1$  – вхідний кут лопаті;

$\beta_2$  – вихідний кут лопаті;  $\beta$  – кут нахилу лопаті (кут між хордою лопаті та утворювальною решіткою).

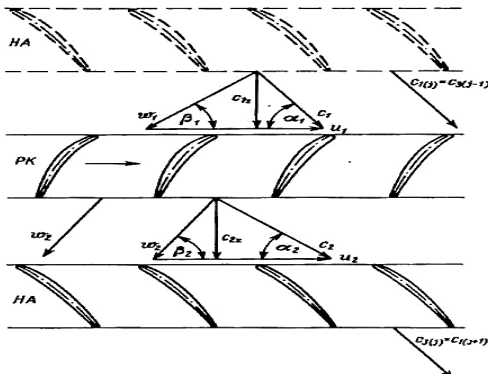


Рисунок 3 – Площа решітка профілів осьового вентилятора

Елементи лопатей осьового вентилятора, що розташовані на різних відстанях від центра, обертаються з різними швидкостями. Внаслідок цього лопать з постійними шириною та кутами входу і виходу утворює напір, який змінюється за її довжиною.

Кут нахилу хорди лопаті до площини обертання лопатного робочого колеса змінюється за законом [15]:

$$r \cdot \text{tg}(\beta_m) = \text{const} \quad (1)$$

де:  $r$  – радіус у місці перетину решітки лопатей;

$\beta_m$  – кут нахилу хорди лопаті.

Також кут нахилу лопаті вентилятора можна визначити з формули для дійсного динамічного тиску на лопаті вентилятора згідно з методикою [10]:

$$\Delta p = \Delta p_t \cdot \frac{1 - \mu \cdot \text{ctg}(\beta)}{1 + \mu \cdot \text{ctg}(\beta)}, \text{ Па} \quad (2)$$

де:  $\mu$  – обернена якість профілю лопатей, береться рівною 0,02 згідно з рекомендаціями [15];

$\beta$  – кут нахилу лопаті вентилятора.

Так, під час вивчення продуктивності засобу димо- та тепловидалення слід досліджувати вплив на зазначену характеристику такого параметра, як кут нахилу лопаті вентилятора.

За результатами аналітичних досліджень, наведених у [16], встановлено,

що в наявних засобах димо- та тепловидалення кут нахилу лопатей вентилятора варіюється в межах від 0,6 до 0,96 радіан. З огляду на це під час подальших досліджень використовуємо мінімальне значення кута нахилу лопатей вентилятора 0,6 радіан, середнє – 0,78 радіан та максимальне – 0,96 радіан.

Наступним параметром, що впливає на продуктивність засобу димо- та тепловидалення, є площа лопатей. Очевидним є те, що це один із найбільш значущих параметрів, у разі збільшення якого підвищується продуктивність засобу, водночас таке підвищення є лінійним. У літературних джерелах немає даних щодо дослідження закономірностей впливу площі лопатей на продуктивність засобу димо- та тепловидалення.

Отже, під час дослідження продуктивності засобу димо- та тепловидалення слід також розглянути вплив на зазначену характеристику такого параметра, як площа лопатей вентилятора. За результатами аналітичних досліджень, проведених у [16], встановлено, що вдосконалення технічних характеристик засобу димо- та тепловидалення сприятиме підвищенню ефективності під час гасіння пожеж у будівлях та спорудах.

Дані щодо діапазону величин параметрів кута нахилу лопаті вентилятора та площі лопаті вентилятора наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Діапазон величин параметрів кута лопаті та площі лопаті вентилятора

Назва параметра	Значення параметра		
	Міні-мальні	Середні	Максимальні
Кут нахилу лопаті, радіани	0,6	0,78	0,96
Площа лопаті, м <sup>2</sup>	0,075	0,127	0,18

Як підсумок, у пропонованій роботі переліком найбільш значущих параметрів, що надалі досліджуємо як вплив на продуктивність засобу димо- та тепловидалення, визначаємо кут нахилу лопаті та площу лопаті.

За критерієм удосконаленого засобу димо- та тепловидалення можна окреслити співвідношення продуктивності

удосконаленого засобу димо- та тепловидалення до неудосконаленого засобу димо- та тепловидалення, що можна навести як рівняння:

$$K = \frac{P_{уд}}{P}, \quad (3)$$

де:  $K$  – критерій продуктивності засобу димо- та тепловидалення;

$P_{уд}$  – продуктивність удосконаленого засобу димо- та тепловидалення;

$P$  – продуктивність неудосконаленого засобу димо- та тепловидалення.

Аналіз додаткових критеріїв для порівняння параметра продуктивності можна здійснювати за небезпечними чинниками пожежі, такими як температура та щільність диму, видалення яких із приміщення забезпечує засіб димо- та тепловидалення.

Для того щоб дослідити ефективність удосконаленого засобу димо- та тепловидалення надалі необхідно провести експериментальні дослідження за такими сценаріями.

1. Провести порівняльні дослідження з визначення продуктивності двох засобів димо- та тепловидалення (неудосконаленого та удосконаленого). Встановити критерій оцінювання – визначення їх продуктивності та виразити його у цифровому та процентному відношенні.

2. Провести порівняльні дослідження з визначення ефективності роботи засобів димо- та тепловидалення (неудосконаленого та удосконаленого з нагнітанням повітря та повітря з тонкорозпилим струменем води) в задимленому приміщенні.

Дослідження провести у такий спосіб: у випробувальному боксі створити максимальне задимлене середовище із застосуванням димової шашки чорного диму. Під час досліджень застосувати технічний комплекс для контролю оптичної щільності полідисперсного газоподібного середовища та інформаційно-виміральної системи «Термоконт». Визначити за максимального задимлення випробувального боксу, за який проміжок часу виникає самостійне

(вільне) розсіювання диму до нормалізації газоповітряного середовища.

Згодом провести низку аналогічних досліджень із застосуванням засобів димо- та тепловидалення (неудосконаленого та удосконаленого з нагнітанням повітря та повітря з тонкорозпилим струменем води) через введення у дверний отвір випробувального боксу та подавання всередину повітря та повітря з тонкорозпилим струменем води. За результатами дослідження визначити проміжок часу, за який виникає розсіювання диму до нормалізації газоповітряного середовища у боксі та коефіцієнт ефективного зниження задимленості у випробувальному боксі.

Критерієм оцінювання визначити порівняння проміжку часу та коефіцієнтів ефективного зниження задимленості у випробувальному боксі за результатами досліджень засобів димо- і тепловидалення (неудосконаленого та удосконаленого з нагнітанням повітря та повітря з тонкорозпилим струменем води).

3. Провести порівняльні дослідження з визначення ефективності роботи засобів димо- та тепловидалення (неудосконаленого та удосконаленого з нагнітанням повітря та повітря з тонкорозпилим струменем води) у приміщенні, де створено високотемпературне середовище.

Дослідження провести у такий спосіб: у випробувальному боксі створити високотемпературне середовище за допомогою двох нестандартних модельних вогнищ пожежі класу В та здійснити вимірювання температури в боксі із застосуванням 9 одиниць термоперетворювачів та інформаційно-виміральної системи «Термоконт». Визначити максимальну температуру та вільне зниження температури у міру вигорання двох модельних вогнищ пожежі протягом певного проміжку часу.

Згодом здійснити низку аналогічних досліджень із застосуванням засобів димо- та тепловидалення (неудосконаленого та удосконаленого з нагнітанням повітря та повітря з

тонкорозпиленним струменем води) через введення у дверний отвір випробувального боксу та подавання всередину повітря та повітря з тонкорозпиленним струменем води. За результатами дослідження визначити проміжок часу, за який виникає зниження температури у боксі, а також коефіцієнт ефективного зниження температури у контрольній точці випробувального боксу.

Критерієм оцінювання визначити порівняння проміжку часу та коефіцієнтів ефективного зниження температури в контрольній точці у випробувальному боксі, за результатами досліджень засобів димо- та тепловидалення (неудосконаленого та удосконаленого з нагнітанням повітря та повітря з тонкорозпиленним струменем води).

### **Висновки та напрями подальших досліджень.**

1. Обґрунтовано перелік параметрів, що мають найбільш значущий вплив на продуктивність засобу димо- та тепловидалення з урахуванням економічних показників щодо виробництва, функціонування та технічного обслуговування засобу в разі зміни параметру, що розглядається, а саме:

кут нахилу профіля лопаті вентилятора та загальна активна площа поверхні робочого колеса вентилятора.

2. Встановлено діапазон значень параметрів, що приймаються під час подальших досліджень, та які становлять для кута нахилу лопаті вентилятора від 0,6 до 0,96 радіан, для активної площі поверхні лопатей вентилятора – від 0,075 до 0,18 м<sup>2</sup>.

3. Обґрунтовано сценарії проведення подальших експериментальних досліджень засобів димо- та тепловидалення, за яких найбільш результативно можливо дослідити залежність ефективності видалення температури та диму з приміщень і будівель від кута нахилу лопаті вентилятора та активної площі лопаті вентилятора засобів димо- та тепловидалення.

4. Встановлено перелік критеріїв для оцінювання результатів експериментальних досліджень залежності продуктивності засобів димо- та тепловидалення від їх технічних характеристик, зокрема це температура та щільність диму.

### **СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Лідер, пошукове і пожежне обладнання. Димовсмоктувачі. URL : <http://www.leader-group.eu/products/fire-fighting-equipment/ventilators-blower-fans-207.html> (дата звернення : 06.03.2023).
2. Grimwood P. Tactical ventilation. Venting actions by on-scene firefighters, used to gain tactical advantage during interior structural firefighting operations. *Asia Pacific Fire*. P. 55–61. URL : <http://www.cfbt-be.com/images/teksten/TacticalVentilation.pdf> (дата звернення : 06.03.2023).
3. Луц В. І., Лазаренко О. В. Димовидалення на пожежі : навч. посіб. Львів : ЛДУ БЖД, 2017. 100 с.
4. Про затвердження Норм табельної належності, витрат і термінів експлуатації пожежно-рятувального, технологічного і гаражного обладнання, інструменту, індивідуального озброєння та спорядження, ремонтно-експлуатаційних матеріалів підрозділів ДСНС України : наказ ДСНС від 29.05.2013 р. № 358. Дата оновлення: 10.06.2021. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0358388-13#Text> (дата звернення : 15.03.2023).
5. Ушаков К. А., Брусиловский И. В., Бушель А. Р. Аэродинамика осевых вентиляторов и элементы их конструкций. Государственное научно-техническое издательство литературы по горному делу, 1960. 424 с.
6. Ніжник В. В., Присяжнюк В. В., Савченко О. В. Аналіз сучасного стану застосування засобів димо- та тепловидалення пожежно-рятувальними підрозділами. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія : Технічні науки*. Т. 34(73). № 1. Київ, 2023. С. 342–348.
7. Turbine-powered high-expansion foam generator : Pat. USA. No. 3500935 A. 1967.
8. Coffman, Large scale positive pressure ventilation machine. Pat. USA. No. 6336594 B1. 1990.
9. Hand-portable firefighting, positive pressure blower. Pat. USA, No. 4906164 A. 1990.
10. Fan unit. Pat. DE, No. 202010008657 U1. 2010.
11. Пристрій для осадження продуктів горіння, зниження температури та збільшення видимості в задимлених приміщеннях : пат. UA № 55428 A 62 C 35/00 ; опубл. 10.12.2010, Бюл. № 23.
12. Гуліда Е. М. Прогнозування величини оптичної густини диму при пожежі в приміщенні. *Пожежна безпека. Збірник наукових праць*. № 18. Львів : 2011. С. 65–70.
13. Луц В. І. Підвищення ефективності застосування переносних пожежних димовсмоктувачів. *Пожежна безпека. Збірник наукових праць*. № 28. Львів, 2016. С. 88–94.
14. Штангерет Н. О. Підвищення ефективності ліквідування пожеж у підвальних приміщеннях комбінованим застосуванням димовсмоктувачів та струменів тонкорозпиленої води : дисертація канд. техн. наук: спец. 21.06.02. Львів, 2019. 180 с.

15. Брусиловский И. В. Выбор густоты решетки профилей и угла атаки в осевых вентиляторах. *Промышленная аэродинамика*. 1975. № 32. С. 93–117.
16. Провести дослідження та розробити пропозиції щодо застосування переносних технічних засобів пожежогасіння для підвищення ефективності гасіння пожеж : Звіт про науково-дослідну роботу / УкрНДІЦЗ. Київ, 2017. 150 с.
8. Порівняльний аналіз технічних характеристик сучасних моделей засобів індивідуального захисту органів дихання / Л. А. Устінова, Р. М. Швець, Н. В. Курділь, В. А. Баркевич, В. І. Сагло, О. А. Євтодьєв. *Український журнал сучасних проблем токсикології*. 2019. № 3. С. 43–55.
9. Король Я., Ліснченко Ю. Основні напрями удосконалення засобів індивідуального захисту шкіри фільтруючого типу. *Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України. Серія : військові та технічні науки*. 2020. № 81(3). С. 358–375.
10. Banaee S., & Que Hee S. S. (2020). Проникнення хімічних речовин в рукавичках : стан сучасних технологій. *Журнал гігієни праці та довкілля*. Ч. 2. 2020. № 17(4). С. 135–164. Doi :10.1080/15459624.2020.1721509.
11. Тарасов Л. А., Сухова А. А., Штукіна Є. А. Технічні характеристики сучасних засобів індивідуального захисту шкіри від несприятливих впливів різних небезпек. *Медико-біологічні та соціологічні проблеми в галузі психології, 38 психологічних наук*. 2020. № 3. С. 76–86. Doi :10.25016/2541-7487-2020-0-3-76-86.
12. Конвенція про безпеку в застосуванні хімічних речовин на виробництві N 170 (укр/рос) : міжнародний документ. *Міжнародна організація праці*. 1990. № 170.
13. Про засоби індивідуального захисту і про скасування Директиви 89/686 ЄЕС : Регламент Європейського парламенту та Ради Європейського Союзу 2016/425 від 09.03.2016. *Офіційний вісник Європейського Союзу*. 2016. L 81/51.
14. Khalil E. A technical overview on protective clothing against chemical hazard // AASCIT J.Chem. 2015. V. 2. P. 67.
15. Про затвердження Правил вибору та застосування засобів індивідуального захисту органів дихання : наказ Державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду від 28.12.2007 р. № 331. *Офіційний вісник України*. 2008. № 28.С. 180. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0285-08>. (дата звернення : 07.02.2022).
16. СОУ МНС 75.2-00013528-002:2010. Безпека у надзвичайних ситуаціях. Фільтрувальні засоби індивідуального захисту органів дихання населення у надзвичайних ситуаціях. Класифікація й загальні технічні вимоги : наказ МНС України від 25.02.2010 р. № 104. *Зареєстровано: Український науково-дослідний інститут стандартизації від 11 березня 2010 р. № 32595752 / 2001*. URL : [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=55006](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=55006) (дата звернення : 07.02.2022).

## REFERENCES

1. Dymovsmoktuvachi. (2023). Lider, poshukove i pozhezhne obladnannya [Leader, search and fire equipment]. Retrieved from <http://www.leader-group.eu/products/fire-fighting-equipment/ventilators-blower-fans-207.html> [in English].
2. Hrimvud, P. Ventyliatsijni dii pozhezhnykiv na misti podii, iaki vykorystovuiut'sia dlia otrymannia taktychnoi perevahy pid chas operatsij pozhezhozasinnia vnutrishnikh konstruksij. [Venting actions by on-scene firefighters, used to gain tactical advantage during interior structural firefighting operations]. *Asia Pacific Fire*, 55–61. Retrieved from <http://www.cfbt-be.com/images/teksten/TacticalVentilation.pdf> [in English].
3. Lusch, V. I., & Lazarenko, O. V. (2017). Dymovydalennia na pozhezhi [Smoke removal on fire]. L'viv : LDU BZHD [in Ukrainian].
4. On the approval of the Norms of the personnel record, costs and terms of operation of fire-rescue, technological and garage equipment, tools, individual weapons and equipment, repair and operational materials of the units of the State Emergency Service of Ukraine. No 358. (2013) [in Ukrainian].
5. Ushakov, K. A., Brusilovskiy, I. V., & Bushel', A. R. (1960). Aerodynamika os'ovykh ventyliatoriv ta elementy ikh konstruksij [Aerodynamics of axial fans and elements of their designs]. *Derzhavne naukovo-tekhniche vydavnytstvo literatury z hirnychoi spravy* [in russian].
6. Nizhnyk V.V., Prysiazhniuk V.V., Savchenko O.V. Analysis of the current state of use of smoke and heat removal means by fire and rescue units. Academic notes of the Tavri National University named after V. I. Vernadskiyi. Series: Technical sciences. Kyiv: Volume 34 (73) No. 1, 2023. P. 342-348 [in Ukrainian].
7. Turbine-powered high-expansion foam generator (1967) [in English].
8. Coffman, Large scale positive pressure ventilation machine (1990) [in English].
9. Hand-portable firefighting, positive pressure blower (1990) [in English].
10. Fan unit (2010) [in English].
11. Device for settling combustion products, reducing temperature and increasing visibility in smoky rooms: pat. UA No. 55428 A 62 C 35/00; published 10.12.2010, Bull. № 23;
12. Gulida E.M. Prediction of the optical density of smoke during a fire in a room. *Fire Security. Collection of scientific works*. Lviv: No. 18, 2011. – С. 65-70.
13. Lush V.I. Increasing the efficiency of the use of portable fire extinguishers. *Fire Security. Collection of scientific works*. Lviv: No. 28, 2016. P. 88-94.
14. Shtangeret N.O. Increasing the efficiency of extinguishing fires in basements by the combined use of smoke extractors and jets of finely sprayed water: candidate's thesis. technical Sciences: specialist 21.06.02. Lviv, 2019. 180 p.
15. Brusilovskiy, I. V. (1975). Vybir hustoty reshitky profiliv ta kuta ataky v os'ovykh ventyliatorakh [Choice of profile grating density and angle of attack in axial fans]. *Moskva: Promyslova aerodynamika* [in russian].
16. Provesty doslidzhennia ta rozrobyty propozyzii schodo zastosuvannia perenosnykh tekhnichnykh zasobiv pozhezhozasinnia dlia pidvyschennia efektyvnosti hasinnia pozhezh (2017). [Conduct research and develop proposals for the use of portable technical means of fire extinguishing to increase the efficiency of fire extinguishing]. Kyiv: UkrNDITsZ, 150 [in Ukrainian].

## DETERMINATION OF PARAMETERS OF SMOKE AND HEAT EXTRACTION EQUIPMENT THAT CHARACTERIZE ITS EFFICIENCY OF FUNCTIONING

V. Prisyazhnik, V. Nizhnyk, V. Benedyuk, S. Zhartovskyi

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

---

### KEYWORDS: ANNOTATION

performance,  
means of smoke  
and heat  
removal,  
parameters,  
criteria, scenario  
for experimental  
studies, fan  
blade inclination  
angle and fan  
blade area.

This publication provides the total number of fire-rescue equipment equipped with portable smoke and heat removal devices, as well as statistics of their use during firefighting in Ukraine. It was established that the vast majority of portable smoke and heat removal devices operated in fire and rescue units are outdated models and require significant improvement of parameters for effective functioning. It is outlined that the main parameter that characterizes the effectiveness of portable smoke and heat removal devices is productivity, which directly affects the duration of tactical ventilation by fire and rescue units, as a result of which the probability of saving people and extinguishing fires increases. The parameters affecting the performance of the fan, in particular its diameter and the number of revolutions, which create a linear relationship between them and the performance of the smoke and heat removal means, are determined. Under this condition, with an increase in the value of the diameter of the fan and the number of revolutions, the productivity of the tool increases. The list of parameters that have the most significant influence on the performance of the smoke and heat removal device, in particular the angle of inclination of the blade and the area of the fan blade, is substantiated. It was determined that for the comparison of the productivity parameter, it is possible to carry out dangerous fire factors, such as temperature and smoke density, the removal of which from the room is provided by means of smoke and heat removal. A list of criteria for comparing the performance parameter for improved and non-improved smoke and heat removal means has been established. The specified criteria will be applied to evaluate the results of experimental studies on the dependence of the productivity of smoke and heat removal devices on their technical characteristics. The scenarios of conducting further experimental studies of smoke and heat removal means are substantiated, under which it is possible to investigate the dependence of the effectiveness of temperature and smoke removal from premises and buildings in the most effective way.

УДК 614.84

## ОБ'ЄКТИ ПІДВИЩЕНОЇ НЕБЕЗПЕКИ: УПРОВАДЖЕННЯ ВДОСКОНАЛЕНИХ ПІДХОДІВ ДО ЇХ ІДЕНТИФІКАЦІЇ

<https://doi.org/10.33269/nvz.2023.1.83-91>

Бойко О. А., ORCID iD 0000-0002-1404-996X

E-mail: oxiukr@ukr.net

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

ІНФОРМАЦІЯ ПРО АНОТАЦІЮ  
СТАТТЮ

*Надійшла до редакції:*

18.04.2023

*Пройшла рецензування:*

09.05.2023

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:**

цивільний захист,  
об'єкти підвищеної  
небезпеки,  
ідентифікація, пожежна  
безпека, законодавство  
Європейського Союзу.

В умовах дії воєнного стану актуальною залишається проблема зниження ризику аварій на об'єктах підвищеної небезпеки та імплементації національного законодавства у сфері діяльності, пов'язаної з об'єктами підвищеної небезпеки, до норм законодавства Європейського Союзу, де основна увага зосереджена на об'єктах, аварії на яких можуть мати катастрофічні наслідки. Проаналізовано дослідження вітчизняних науковців з питань безпеки об'єктів підвищеної небезпеки та методів їх ідентифікації. Переважна їх більшість ґрунтується на чинній нормативній базі відповідного періоду. Зміни в національному законодавстві, що відбуваються останнім часом, зокрема у зв'язку з імплементацією до вимог Директиви Севезо III, поставили ряд проблемних питань в контексті формування вдосконалених підходів до питань безпеки об'єктів підвищеної небезпеки, вдосконалення порядку ідентифікації об'єктів підвищеної небезпеки та їх обліку, страхування цивільної відповідальності суб'єктів господарювання за шкоду, яку може бути заподіяно аваріями на об'єктах підвищеної небезпеки тощо. Під час підготовки статті використано метод теоретичних досліджень, складовими яких є аналітичні дослідження та метод експертної оцінки. Встановлено основні етапи проведення ідентифікації об'єктів підвищеної небезпеки, визначення 1, 2 та 3 класів об'єктів підвищеної небезпеки. Вказується на спрощення ведення реєстру об'єктів підвищеної небезпеки внаслідок його цифровізації. Тема статті є актуальною та відзначається новизною дослідження, враховуючи наукові спроби аналізу впровадження вдосконалених підходів до ідентифікації об'єктів підвищеної небезпеки в Україні. Визначено напрями подальших досліджень у сфері безпеки об'єктів підвищеної небезпеки, формування політики запобігання аваріям на об'єктах підвищеної небезпеки 1 або 2 класу, її змісту, порядку розроблення, перегляду, а також оцінки ефективності, розроблення й затвердження планів локалізації і ліквідації аварій та їх наслідків, вдосконалення нормативно-правової бази, розв'язання проблем, пов'язаних із ідентифікацією об'єктів підвищеної небезпеки, веденням їх обліку, страхуванням у сфері цивільного захисту, навчанням та підвищенням кваліфікації фахівців, відповідальних за ведення обліку об'єктів підвищеної небезпеки.

**Постановка проблеми.** В умовах дії воєнного стану особливо гостро постають питання оперативного реагування на надзвичайні ситуації, зокрема пожежі, та ефективної ліквідації їх наслідків. Це підтверджується статистикою дій за призначенням органів та підрозділів ДСНС у 2022 році: здійснено

75 тис. 215 виїздів на ліквідацію наслідків обстрілів населених пунктів, під час бойових дій зруйновано та пошкоджено близько 169 тис. об'єктів інфраструктури. В населених пунктах та на об'єктах суб'єктів господарювання зафіксовано 80 тис. 654 пожежі, що на 1,5% більше порівняно з 2021 роком. На об'єктах, на

яких здійснюється державний нагляд (контроль), виникло 2 тис. 790 пожеж (+ 68, 7%) [1].

Нині суттєво змінюється законодавство України щодо об'єктів підвищеної небезпеки (далі – ОПН), зокрема згідно із Законом України «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо об'єктів підвищеної небезпеки» від 15 липня 2021 року № 1686-IX із чинного на той час законодавства вилучено термін «потенційно-небезпечний об'єкт», уточнено чинні та введено низку нових понять, визначено, що ДСНС здійснює координацію дій інших органів з метою попередження надзвичайних ситуацій, а також спрямовує аварійне оповіщення та інформацію у разі транскордонного впливу аварії на ОПН в іншій країні. Ця норма визначена як двостороння [2].

Найбільше змін щодо об'єктів підвищеної небезпеки, які набрали чинності з 6 серпня 2022 року, внесено до Кодексу цивільного захисту України [3].

Змінено підходи до проведення ідентифікації ОПН, скасовано декларації безпеки на ОПН, натомість оператори ОПН 1 та 2 класу зобов'язані самостійно визначати і затверджувати політику запобігання аваріям на цих об'єктах, розробляти звіт про заходи безпеки на ОПН, впорядковано процедуру ведення обліку ОПН та ведення Державного реєстру об'єктів підвищеної небезпеки.

У статті аналізуються ці та інші питання, розглядаються протиріччя, які існують у перехідний період.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання безпеки на ОПН досліджувались в таких роботах вітчизняних науковців.

О. Григоренко, Ю. Ключка та С. Гарбуз дослідили питання класифікації об'єктів підвищеної небезпеки з урахуванням імплементації Директиви Севезо III на території України та провели порівняння кількості ОПН в країнах – членах ЄС, оцінку параметрів надзвичайної ситуації, можливої на

об'єктах з наявністю ємностей зі стиснутим природним газом [4].

Пріоритети формування реєстру об'єктів критичної інфраструктури та порядку їх обліку досліджував С. Іванюта. Він окреслив пріоритетні напрями діяльності Кабінету Міністрів України, інших органів влади щодо відпрацювання заходів із законодавчого та організаційного забезпечення формування Реєстру об'єктів критичної інфраструктури і порядку їх обліку [5].

Заслуговує на увагу дослідження О. Яцухю, М. Зорею та І. Мохнатком питань ідентифікації потенційно небезпечних об'єктів України на засадах ризик-орієнтованого підходу. На наш погляд, ризик-орієнтований підхід може бути використаний і в нових умовах роботи з ОПН, зокрема в напрямі їх ідентифікації [6].

Один із авторів законопроекту від 15.07.2021 № 1686-IX Т. Поліщук у своєму дослідженні наголошує на питаннях упорядкування процедури ідентифікації ОПН, встановлення вимог до ОПН залежно від їх класу, а не однакових, як раніше, скасування декларації безпеки ОПН та визначення і затвердження політики запобігання аваріям на цих об'єктах. Вказується на факт визначення Законом України порядку дій у разі виникнення аварії на ОПН [7].

Деякі питання визначення категорії техногенної небезпеки об'єктів господарської діяльності під час виконання комплексних судових пожежно-технічних та інженерно-екологічних експертиз досліджували Р. Гусейнов, Ю. Панчук та І. Рябікін [8].

В. Андрейцев вивчав суб'єктний склад та деякі господарсько-правові аспекти діяльності, пов'язаної з ОПН. Досліджено законодавство України у сфері визнання суб'єктів господарської діяльності, пов'язаної з ОПН, уточнено визначення таких об'єктів, наведено характеристику суб'єктного складу діяльності, пов'язаної з ОПН [9].

Послідовність ідентифікації об'єктів підвищеної небезпеки та страхування



відповідальності за завдану шкоду під час їх експлуатації досліджували Р. Романюк, В. Маховський та О. Крюковська. Ця тема стає все більш актуальною, зокрема в контексті запровадження страхування цивільної відповідальності суб'єктів господарювання за шкоду, яку може бути заподіяно аваріями на ОПН [10].

Розвиток методичного забезпечення антитерористичної захищеності об'єктів критичної інфраструктури (на прикладі США) вивчали Б. Леонов, Р. Шостак та В. Серьогін. На базі аналізу позитивного американського досвіду запропоновано заходи з удосконалення методичного забезпечення антитерористичної захищеності об'єктів критичної інфраструктури України [11].

Більшість авторів за результатами проведених досліджень пропонували внесення змін та доповнень до чинного Закону України «Про об'єкти підвищеної небезпеки» від 18 січня 2001 року № 2245–III та інших законодавчих актів з метою приведення законодавства України у сфері безпеки ОПН у відповідність із законодавством Європейського Союзу та сприяння мінімізації збитків від надзвичайних ситуацій.

Водночас слід зауважити, що переважна більшість проаналізованих досліджень вітчизняних науковців ґрунтується на чинній на той час нормативній базі з питань ідентифікації об'єктів підвищеної небезпеки, зокрема вимогах постанови Кабінету Міністрів України від 11.07.2002 № 956 «Про ідентифікацію та декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки», яка втратила чинність.

Саме на питаннях практичного впровадження нових підходів до ідентифікації ОПН, внесення змін до чинного законодавства наголошено у цьому дослідженні.

**Формулювання цілей дослідження.** Проведення аналізу теоретичних досліджень питань безпеки на об'єктах підвищеної небезпеки та імплементації національного законодавства до стандартів

Європейського Союзу. Дослідження нових підходів до ідентифікації ОПН, визначення політики запобігання аваріям на ОПН, розв'язання наявних протиріч в цьому напрямі діяльності.

**Методи дослідження.** Під час дослідження нових підходів до проведення ідентифікації об'єктів підвищеної небезпеки використано метод теоретичних досліджень, складовими яких є аналітичні дослідження та метод експертної оцінки.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Останнім часом все більшої актуальності набуває проблема зниження ризику аварій на ОПН та імплементації національного законодавства у сфері діяльності, пов'язаної з ОПН, до норм законодавства Європейського Союзу.

Закон України «Про об'єкти підвищеної небезпеки» від 18 січня 2001 року № 2245–III розроблявся з урахуванням вимог Директиви Ради 96/82/ЄС від 9 січня 1996 року і надалі до нього також вносилися відповідні зміни [12].

До прийняття змін до чинного законодавства в Україні здійснювався облік як близько 26 тис. потенційно небезпечних об'єктів, так і 9 тис. об'єктів підвищеної небезпеки. Цей облік відзначався громіздкістю, розбіжностями, суттєво відрізнявся підходами до його ведення з тими, які використовуються в країнах Європейського Союзу.

Для порівняння наведемо дані про кількість промислових об'єктів, які підлягають декларуванню безпеки у деяких країнах Європейського Союзу (табл. 1).

Аналіз даних, наведених у табл. 1, та порівняння їх із кількістю ОПН на території України показує, що в країнах ЄС кількість ОПН у десятки разів менша. Це пояснюється особливостями нормативно-правової бази, раніше прийнятої в Україні для ідентифікації ОПН, якою передбачено визначення порогових мас небезпечних речовин з урахуванням відстаней до елементів селитебної території або промислових об'єктів.

Таблиця 1 – Кількість об’єктів, які підлягають декларуванню безпеки у деяких країнах ЄС, та їх частка серед об’єктів промисловості

Параметр	Країна-член ЄС									
	Бельгія	Данія	ФРН	Греція	Іспанія	Франція	Італія	Нідерланди	Фінляндія	Швеція
Кількість об’єктів, які підлягають декларуванню безпеки	137	23	815	108	216	626	474	174	80	133
Частка, серед об’єктів промисловості, %	4	1	26	3	7	19	14	5	2	4

Джерело: [4]

Ухваленою 4 липня 2012 року Директивою Севезо III розширено перелік підприємств, об’єктів і видів діяльності, на які не поширюється її дія (військові підприємства; об’єкти видобувних галузей промисловості; транспортування небезпечних речовин, зокрема магістральними трубопроводами; морська розвідка і розробка корисних копалин, включаючи вуглеводні; зберігання газу на підводних морських майданчиках і майданчиках, на яких проводять розвідку та розробку корисних копалин; звалища відходів, включаючи підземне зберігання відходів тощо) [13].

Визначення терміна «об’єкт підвищеної небезпеки» наведено в Законі України «Про об’єкти підвищеної небезпеки» – це єдиний майновий комплекс підприємства, що включає будь-які будівлі, виробництва (цехи, відділення, виробничі дільниці), окреме обладнання та джерела небезпеки, розташовані в межах території такого об’єкта, який за результатами ідентифікації об’єктів підвищеної небезпеки вважається об’єктом підвищеної небезпеки відповідного класу [12].

Порядок розроблення та погодження документів на ОПН наведено на рис. 1.

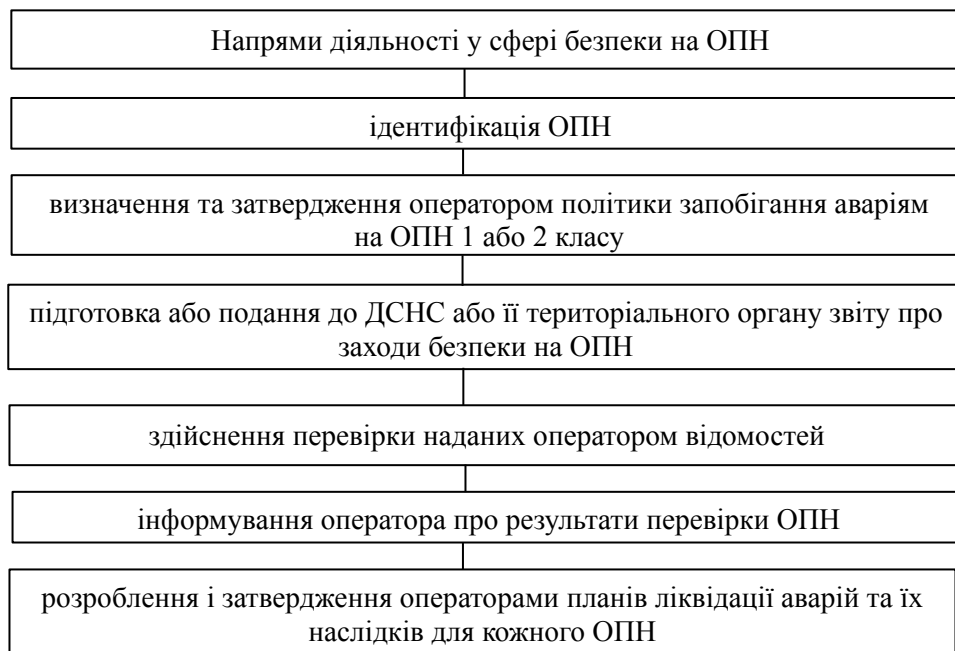


Рисунок 1 – Порядок розроблення та погодження документів на ОПН

Розроблено автором

Згідно із Законом України від 15.07.2021 № 1686-IX скасовано декларації

безпеки на ОПН, натомість оператори ОПН 1 та 2 класу самостійно визначають

та затверджують політику запобігання аваріям на цих об'єктах і надають їй ДСНС, а також готують і надають звіт про заходи безпеки на об'єктах, які вони експлуатують. Оператори також розробляють плани локалізації й ліквідації аварій та їх наслідків для кожного свого ОПН. Такі плани переглядаються не рідше ніж раз на три роки.

Слід підкреслити, що ідентифікація об'єкта підвищеної небезпеки – це процедура, за результатами виконання якої об'єкт підвищеної небезпеки вважається об'єктом підвищеної небезпеки відповідного класу [12].

Важливим етапом вдосконалення національного законодавства стосовно ОПН стало ухвалення постанови Кабінету Міністрів України від 13.09.2022 № 1030 «Деякі питання ідентифікації об'єктів підвищеної небезпеки», якою, зокрема, приведено у відповідність із законодавством Європейського Союзу нормативи порогових мас небезпечних речовин і процедуру ідентифікації об'єктів підвищеної небезпеки [14].

Затвердженим Порядком ідентифікації об'єктів підвищеної небезпеки та ведення їх обліку (далі –

Порядок) визначено процедуру віднесення об'єктів, в яких використовується, переробляється, виготовляється, транспортується, зберігається одна або декілька небезпечних речовин, до ОПН відповідного класу.

Ідентифікація ОПН проводиться з метою оцінювання впливу небезпеки від небезпечних речовин на здоров'я людини, об'єкти інфраструктури та навколишнє природне середовище. Наведено визначення таких термінів, як «державний електронний реєстр об'єктів підвищеної небезпеки», «категорія небезпеки», «клас небезпеки небезпечної речовини» («клас небезпечної речовини»), «повідомлення про результати ідентифікації об'єкта підвищеної небезпеки».

У Порядку зазначено, що ідентифікація ОПН проводиться юридичними або фізичними особами-підприємцями стосовно об'єктів, які перебувають у їх власності або користуванні. Ідентифікація ОПН стосовно об'єктів, які проєктуються, проводиться замовником будівництва.

Можна виокремити основні етапи проведення ідентифікації ОПН, які наведені на рис. 2.

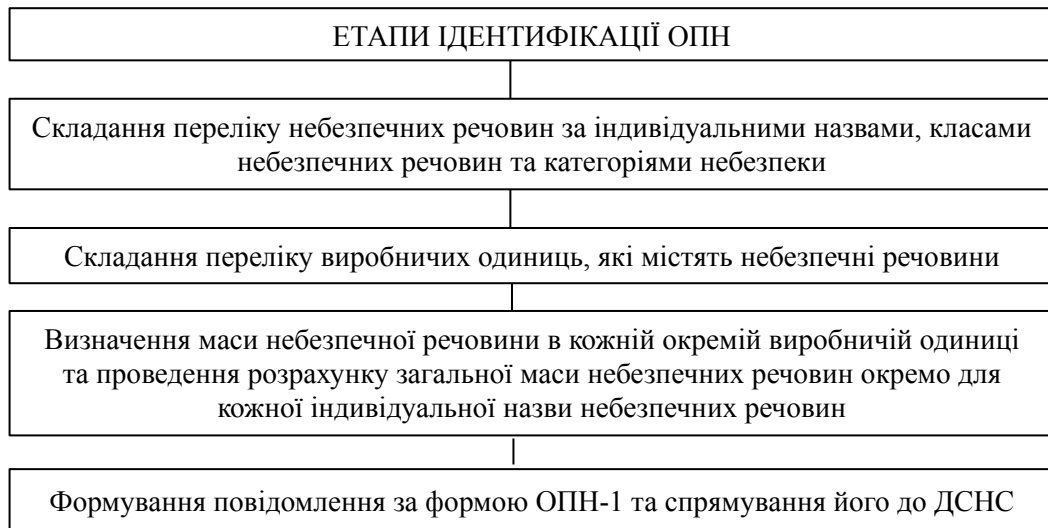


Рисунок 2 – Етапи проведення ідентифікації ОПН

Нині запроваджено розподіл ОПН на три класи відповідно до чинного законодавства з метою розмежування вимог з урахування класу небезпеки та встановлення конкретних вимог до

кожного класу ОПН. Такий підхід дає змогу врахувати вимоги Директиви Севезо III не тільки для об'єктів, аварія на яких може становити значну загрозу, у тому числі на транскордонному рівні

(1 і 2 класи ОПН), а й враховувати вимоги національного законодавства для об'єктів, на яких можуть виникнути значні аварії, що можуть загрожувати безпеці населення на території України (3 клас).

Імплементация в зазначеній постанові вимог Директиви Севезо III за попередніми розрахунками допоможе

зменшити кількість підприємств на території України, що підпадають під контроль за загрозами небезпек, до 15% від кількості таких об'єктів на час внесення змін до чинного законодавства.

Належність об'єктів до ОПН відповідного класу наведено на рис. 3.

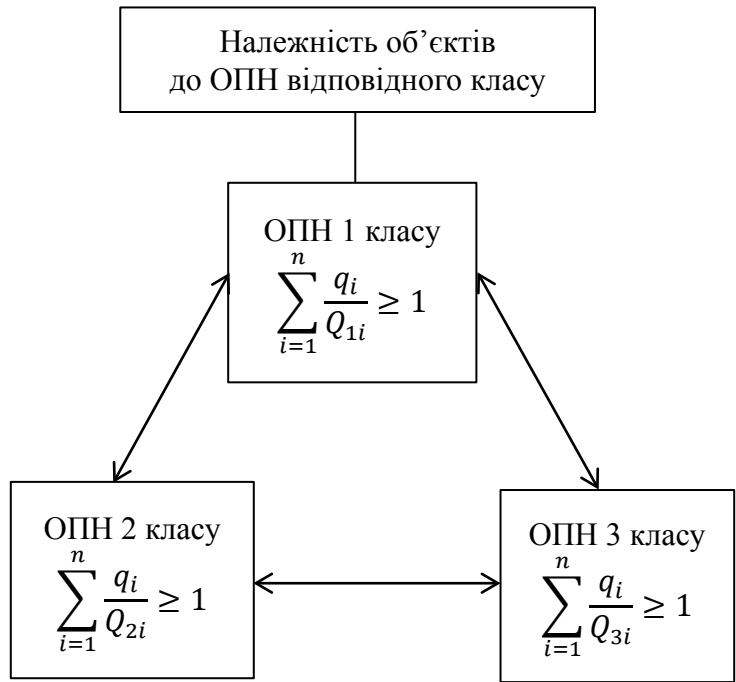


Рисунок 3 – Належність об'єктів до ОПН відповідного класу

Узагальнено автором

У наведених на рис. 3 формулах:  $q_i$  – маса окремої небезпечної речовини за індивідуальною назвою або класом небезпечної речовини (категорією небезпеки) відповідно до табл. 1 або 2 додатка 1 до Порядку, а відповідно  $Q_{1i}$ ,  $Q_{2i}$  та  $Q_{3i}$  – порогова маса окремої небезпечної речовини за індивідуальною назвою або класом небезпечної речовини (категорією небезпеки) відповідно для ОПН 1, 2 та 3 класу визначена в табл. 1 або 2 додатка 1 до Порядку [14].

Деякі питання забезпечення безпеки на ОПН врегульовані виданням наказів МВС України від 21.02.2023 № 114 «Про затвердження Порядку розроблення звіту про заходи безпеки на об'єкті підвищеної небезпеки» (зареєстровано в Мін'юсті

08.03.2023 за № 417/39473) та від 21.02.2023 № 115 «Про затвердження Порядку розроблення політики запобігання аваріям на об'єкті підвищеної небезпеки» (зареєстровано в Мін'юсті 08.03.2023 за № 416/39472).

На етапі вирішення перебувають питання ведення обліку ОПН. Раніше облік потенційно небезпечних об'єктів здійснювався Департаментом страхового фонду документації Державної архівної служби України, а ОПН – як Державною службою України з питань праці, так і Державною службою України з надзвичайних ситуацій.

На сьогодні завдання ведення обліку ОПН та ведення Державного реєстру ОПН

покладено на Державну службу України з надзвичайних ситуацій.

На наш погляд, потребує вивчення досвід діяльності експертно-технічних центрів Державної служби України з питань праці, які раніше забезпечували проведення експертної оцінки стану ОПН.

Як відомо, в Україні здійснено перехід надання державних послуг у цифровому вигляді. Однак нині немає нормативно-правової бази щодо ведення Державного електронного реєстру ОПН.

Державний електронний реєстр ОПН – це інформаційно-комунікаційна система, що створюється відповідно до вимог Закону України «Про публічні електронні реєстри», держателем якої є ДСНС, та яка забезпечує збирання, накопичення, захист, облік, відображення, оброблення реєстрових даних та надання реєстрової інформації, а також електронну взаємодію між фізичними та юридичними особами, державними органами, органами місцевого самоврядування з метою отримання визначеної законодавством інформації у сфері діяльності, пов'язаної з об'єктами підвищеної небезпеки [14].

Значний комплекс питань, які підлягають вирішенню у перехідний період, пов'язані також зі страхуванням у сфері цивільного захисту, цивільної відповідальності суб'єктів господарювання за шкоду, яку може бути заподіяно аваріями на ОПН тощо [15].

**Висновки та напрями подальших досліджень.** За результатами проведеного аналізу робимо висновок щодо прогресивного значення запровадження в Україні вдосконалених підходів до ідентифікації ОПН, внесення подальших змін до національного законодавства з питань ОПН.

Зазначене також сприяє подальшому співробітництву України з Європейським Союзом у сфері протидії транскордонним надзвичайним ситуаціям, напрацюванню ефективного механізму координації між ДСНС та державами-членами

Європейського Союзу в боротьбі з наслідками аварій та надзвичайних ситуацій, які мають транскордонний вплив, розвитку співробітництва з Механізмом цивільного захисту Європейського Союзу в контексті підписання 20 квітня 2023 року Угоди про вступ України до цієї системи міжнародної координованої оперативної допомоги під час надзвичайних ситуацій.

Виконання пункту 28 плану пріоритетних дій Уряду на 2023 рік, в якому ДСНС визначено завдання запровадження до липня 2023 року Державного електронного реєстру об'єктів підвищеної небезпеки, зокрема з використанням програмного засобу «Гід з державних послуг», забезпечить відвтручання контролюючого органу в процес автоматичного обрахування показників небезпеки під час проведення ідентифікації ОПН. Унаслідок виконання зазначеного завдання з'являться також додаткові адміністративні послуги щодо: віднесення об'єкта до ОПН відповідного класу з присвоєнням відповідного номера в Державному електронному реєстрі ОПН; виключення ОПН з Державного електронного реєстру ОПН [16].

У контексті важливості питань оперативного та ефективного реагування на надзвичайні ситуації надалі напрямами досліджень є вдосконалення механізму визначення та затвердження політики запобігання аваріям на ОПН 1 або 2 класу; її змісту, порядку розроблення, перегляду, а також оцінки ефективності; розроблення і затвердження планів локалізації і ліквідації аварій та їх наслідків для кожного ОПН; запровадження страхування цивільної відповідальності суб'єктів господарювання за шкоду, яку може бути заподіяно аваріями на ОПН; вжиття комплексу заходів для досягнення необхідного зниження пожежних ризиків від найбільш небезпечних джерел; забезпечення середнього ризику на всій території України на рівні нормативу прийняттого ризику розвинених країн.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Звіт про основні результати діяльності Державної служби України з надзвичайних ситуацій у 2022 році. URL : <https://dSNS.gov.ua/upload/1/6/4/9/3/5/0/publicnii-zvit-2022-ostannia-versiia-1.pdf> (дата звернення : 10.04.2023).
2. Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо об'єктів підвищеної небезпеки : Закон України від 15.07.2021 р. № 1686-IX. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1686-20#n6> (дата звернення : 10.04.2023).
3. Кодекс цивільного захисту України: Закон України від 02.10.2012 р. № 5403-VI. Дата оновлення : 31.03.2023. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text> (дата звернення : 10.04.2023).
4. Григоренко О. М., Ключка Ю. П., Гарбуз С. В. Класифікація об'єктів підвищеної небезпеки з урахуванням імплементації Директиви Севезо 3 на території України. *Збірник наукових праць НУЦЗУ*. 2017. № 25. С. 14–21. URL : <https://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfEmergencies/vol25/grigorenko.pdf>
5. Іванюта С. П. Пріоритети формування реєстру об'єктів критичної інфраструктури та порядку їх обліку. *Стратегічні пріоритети*. 2018. № 3–4 (48). С. 26–35.
6. Яцук О. В., Зоря М. В., Мохнатко І. М. Ідентифікація потенційно-небезпечних об'єктів України на засадах ризик-орієнтованого підходу. *Вища освіта України у контексті інтеграції до європейського освітнього простору*. 2022. Т. 89. № (II) 1. С. 79–88. URL : <https://doi.org/10.38014/osvita.2022.89.07>
7. Поліщук Т. В. Закон спрямований на зниження ризику аварії на об'єктах підвищеної небезпеки. *Пожежна та техногенна безпека*. 2021. № 9(96). С. 4–5.
8. Гусейнов Р. Н., Панчук Ю. В., Рябікін І. М. Деякі питання визначення категорії техногенної небезпеки об'єктів господарської діяльності при виконанні комплексних судових пожежно-технічних та інженерно екологічних експертиз. *Теорія та практика судової експертизи і криміналістики*. 2020. Вип. 19. С. 539–549.
9. Андрейцев В. В. Суб'єктний склад діяльності, пов'язаної з об'єктами підвищеної небезпеки: господарсько-правові аспекти. *Економіка та право*. 2019. № 3. С. 39–48. URL : [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ecpr\\_2019\\_3\\_5](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ecpr_2019_3_5).
10. Романюк Р. Я., Маховський В. О., Крюковська О. А. Послідовність ідентифікації об'єктів підвищеної небезпеки та страхування відповідальності за завдану шкоду при їх експлуатації. *Математичне моделювання*. 2020. № 1 (42). С. 165 – 172.
11. Леонов Б.Д., Шостак Р.М., Серьогін В.С. Розвиток методичного забезпечення антитерористичної захищеності об'єктів критичної інфраструктури (на прикладі США). *Інформація і право*. 2020. № 3(34). С. 88–95.
12. Про об'єкти підвищеної небезпеки : Закон України від 18.01.2001 р. № 2245-III. Дата оновлення: 31.03.2023. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2245-14#Text> (дата звернення : 10.04.2023).
13. Directive 2012/18/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on the control of major-accident hazards involving dangerous substances, amending and subsequently repealing Council Directive 96/82/EC. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2012/18/oj> (дата звернення : 10.04.2023).
14. Деякі питання ідентифікації об'єктів підвищеної небезпеки: постанова Кабінету Міністрів України від 13.09.2022 р. № 1030. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1030-2022-%D0%BF#Text> (дата звернення : 10.04.2023).
15. Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо перших кроків дерегуляції бізнесу шляхом страхування цивільної відповідальності : Закон України від 06.10.2022 р. № 2655-IX. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2655-20/conv#n24> (дата звернення : 10.04.2023).
16. Про затвердження плану пріоритетних дій Уряду на 2023 рік : розпорядження Кабінету Міністрів України від 14.03.2023 р. № 221-р. URL : <https://www.kmu.gov.ua/nps/pro-zatverdzhennia-planu-priorytetnykh-dii-uriadu-na-2023-rik-221r-140323> (дата звернення : 10.04.2023).

REFERENCES

1. Zvit pro osnovni rezultaty diialnosti Derzhavnoi sluzhby Ukrainy z nadzvychainykh sytuatsii u 2022 rotsi: Retrieved from: <https://dSNS.gov.ua/upload/1/6/4/9/3/5/0/publicnii-zvit-2022-ostannia-versiia-1.pdf>[in Ukrainian].
2. Pro vnesennia zmin do deiaikykh zakonodavchykh aktiv Ukrainy shchodo ob'ektiv pidvyshchenoi nebezpeky: Zakon Ukrainy vid 15.07.2021 r. № 1686 – IX. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1686-20#n6> [in Ukrainian].
3. Kodeks tsyvilnoho zakhystu Ukrainy: Zakon Ukrayini vid 02.10.2012 № 5403-VI // Baza danih «Zakonodavstvo Ukrayini» / Verhovna Rada Ukrayini. Retrived from : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text> [Code of Civil Protection of Ukraine : Law of Protection of Ukraine : dated 02.10.2012 № 5403-VI // Database «Legislation of Ukraine» / The Verkhovna Rada of Ukraine]. (data zvernennia : 08.05.2023) [in Ukrainian].
4. Hryhorenko, O. M., Kliuchka, Yu. P., Harbuz, S. V. (2017) Klyasyfikatsiia ob'ektiv pidvyshchenoi nebezpeky z urakhuvanniam implementatsii Dyrektyvy Sevezo 3 na terytorii Ukrainy. [Classification of objects of increased danger taking into account the implementation of the Sevezo Directive 3 in the territory of Ukraine] *Zbirka naukovykh prats NUTsZU*. P. 14–21. Retrieved from: <https://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfEmergencies/vol25/grigorenko.pdf> [in Ukrainian].
5. Ivaniuta, S.P. (2018). Priorytety formuvannia reiestru ob'ektiv krytychnoi infrastruktury ta poriadku yikh obliku. [Priorities of creating a register of critical infrastructure objects and the order of their accounting] *Stratehichni priorytety*. P. 26 – 35.
6. Yatsukh, O. V., Zoria, M. V., Mokhnatko, I. M. (2022). Identyfikatsiia ob'ektiv pidvyshchenoi nebezpechnykh ob'ektiv Ukrainy na zasadakh ryzyk-orientovanoho pidkhodu. [Identification of potentially dangerous objects of Ukraine on the bases risk-oriented approach] *Vyshcha osvita Ukrainy u konteksti intehtatsii do yevropeiskoho osvitnoho prostoru*. P. 79–88. Retrieved from: <https://doi.org/10.38014/osvita.2022.89.07> [in Ukrainian].
7. Polishchuk, T. V. (2021). Zakon spriamovanyi na znyzhennia ryzyku avarii na ob'iektakh pidvyshchenoi nebezpeky.[ The law is aimed at reducing the risk of accidents at high-risk facilities] *Pozhezha ta tekhnohenna bezpeka*. P. 4–5[in Ukrainian].
8. Huseinov, R. N., Panchuk, Yu. V., Riabikin, I. M. (2020). Deiaiki pytannia vyznachennia katehorii tekhnohennoi nebezpeky ob'ektiv hospodarskoi diialnosti pry vykonanni kompleksnykh sudovykh pozhezho-tekhnichnykh ta inzhenerno ekolohichnykh ekspertyz.[ Some issues of determining the category of man-made danger of objects of economic activity during the performance of complex forensic fire-technical and engineering-environmental examinations] *Teoriia ta praktyka sudovoi ekspertyzy i kryminalistyky*. P. 539–549. [in Ukrainian].

9. Andreitsev, V. V. (2019). Subiektnyi sklad diialnosti, poviazanoi z ob'ektyami pidvyshchenoi nebezpeky: hospodarsko-pravovi aspekty. [Entity composition of activities related to objects of increased danger: economic and legal aspects]. *Ekonomika ta pravo*. P. 39-48. Retrieved from: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ecpr\\_2019\\_3\\_5](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ecpr_2019_3_5). [in Ukrainian].
10. Romaniuk R.Ia., Makhovskiy V.O., Kriukovska O.A. Poslidovnist identyfikatsii ob'ektiv pidvyshchenoi nebezpeky ta strakhuvannia vidpovidalnosti za zavdanu shkodu pry yikh ekspluatatsii. *Matematychno modeliuвання*. 2020. № 1(42). S. 165 – 172. [in Ukrainian].
11. Leonov, B. D., Shostak, R. M., Serohin, V. S. (2020). Rozvytok metodychnoho zabezpechennia antyterrorystychnoi zakhyshchenosti ob'ektiv krytychnoi infrastruktury (na prykladi SSHA). [Development of methodical provision of anti-terrorist protection of critical infrastructure objects (using the example of the USA)]. *Informatsiia i pravo*. P. 88 – 95. [in Ukrainian].
12. Pro ob'ekty pidvyshchenoi nebezpeky: Zakon Ukrainy vid 18.01.2001 r. № 2245-III. Data onovlennia: 31.03.2023. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2245-14#Text> [in Ukrainian].
13. Directive 2012/18/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on the control of major-accident hazards involving dangerous substances, amending and subsequently repealing Council Directive 96/82/EC. Retrieved from: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2012/18/oj> [in English].
14. Deiakі pytannia identyfikatsii ob'ektiv pidvyshchenoi nebezpeky: postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 13.09.2022 r. № 1030. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1030-2022-%D0%BF#Text> [in Ukrainian].
15. Pro vnesennia zmin do deiakyykh zakonodavchykh aktiv Ukrainy shchodo pershykh krokiv derehuliatcii biznesu shliakhom strakhuvannia tsyvilnoi vidpovidalnosti: Zakon Ukrainy vid 06.10.2022 r. № 2655-IX. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2655-20/conv#n24> [in Ukrainian].
16. Pro zatverdzhennia planu priorytetnykh dii Uriadu na 2023 rik: rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 14.03.2023 r. № 221 – r. Retrieved from: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennia-planu-priorytetnykh-dii-uriadu-na-2023-rik-221r-140323> [in Ukrainian].

## FACILITIES OF INCREASED DANGER: IMPLEMENTATION OF ADVANCED APPROACHES TO THEIR IDENTIFICATION

O. Boiko

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

KEYWORDS:

ANNOTATION

civil protection, objects of increased danger, identification, fire safety, legislation of the European Union

In the conditions of martial law, the problem of reducing the risk of accidents at high-risk facilities and the implementation of national legislation in the field of activities related to high-risk facilities to the norms of the European Union legislation, where the main attention is paid to facilities, remains relevant. accidents that can have catastrophic consequences. The research of domestic scientists on the safety of high-risk objects and methods of their identification was analyzed. The vast majority of them are based on the current regulatory framework of the relevant period. Recent changes in national legislation, in particular in connection with the implementation of the requirements of the Sevezo III Directive, have raised a number of problematic issues in the context of the formation of improved approaches to the safety of high-risk objects, improving the procedure for identifying high-risk objects and their accounting, civil liability insurance of business entities for damage that may be caused by accidents at high-risk facilities, etc. During the preparation of the article, the method of theoretical research was used, the components of which are analytical research and the method of expert evaluation. The main stages of identification of high-risk objects, determination of classes 1, 2 and 3 of high-risk objects have been established. The simplification of keeping the register of high-risk objects due to its digitization is noted. The topic of the article is relevant and marked by the novelty of the research, taking into account scientific attempts to analyze the implementation of improved approaches to the identification of high-risk objects in Ukraine. The directions of further research in the field of safety of high-risk objects, the formation of an accident prevention policy at class 1 or 2 high-risk objects, its content, the procedure for development, review, as well as the assessment of effectiveness, the development and approval of plans for the localization and elimination of accidents and their consequences, improvement of the legal framework, solving problems related to the identification of high-risk objects, keeping their records, insurance in the field of civil protection, training and upgrading the qualifications of specialists responsible for keeping records of high-risk objects.

УДК 614.841

## СУЧАСНИЙ СТАН І НАПРЯМИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ВОДНИХ ВОГНЕГАСНИХ РЕЧОВИН

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1.92-100>

Карвацька М. Я. \* ORCID iD 0000-0002-2659-2724

Лавренюк О. І. ORCID iD 0000-0003-4509-2896

Михалічко Б. М. ORCID iD 0000-0002-5583-9992

\*E-mail: mkarvatska91@gmail.com

*Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна*

### ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

*Надійшла до редакції: 09.04.2023*

*Пройшла рецензування: 14.05.2023*

### КЛЮЧОВІ СЛОВА:

водні вогнегасні речовини, інгібітори горіння, неорганічні солі, аерозольне вогнегасіння.

### АНОТАЦІЯ

Одним із актуальних завдань у справі пожежогасіння є пошук і дослідження нових вогнегасних засобів та удосконалення тих, які вже існують, оскільки ефективність боротьби з пожежами значною мірою залежить від якості вогнегасних речовин та технологій з їх застосування. З метою окреслення шляхів вдосконалення вогнегасних засобів та пошуку нових необхідно провести детальний аналіз сучасних досягнень в області застосування цих засобів, що використовуються для гасіння осередків пожеж класу В, виявити їхні переваги та недоліки. У світовій практиці для запобігання виникненню пожеж класу В та для їх гасіння широко застосовують аерозольне подавання водних вогнегасних речовин (далі – ВВР) у полум'я. З огляду на це зосереджено увагу на порівняльному аналізі вогнегасної ефективності відомих на сьогодні ВВР, проведено узагальнення способів приготування їх водних розчинів та розглянуто взаємозв'язок між вогнегасною ефективністю та концентрацією ВВР. Відповідно до аналізу сучасного стану для гасіння пожеж класу В та підвищення надійності протипожежного захисту різних промислових об'єктів традиційно використовують здебільшого аерозольне подавання ВВР на основі різних солей s-металів та амонію. Основним складником, інгібітором горіння, в усіх цих засобах пожежогасіння є хлориди, карбонати, фосфати лужних та лужноземельних металів та амонію, які здатні припиняти процес горіння винятково в полум'ї за нез'ясованим досі механізмом інгібування горіння. Окрім традиційних солей-інгібіторів горіння, високу вогнегасну ефективність здатні виявляти солі d-металів, які спроможності гальмувати утворення активних радикалів безпосередньо в полум'ї. В цьому плані дуже перспективними ВВР, які варто розробляти, є концентровані водні розчини неорганічних солей d-металів.

### Постановка проблеми.

Ефективність боротьби з пожежами значною мірою залежить від якості вогнегасних речовин та технологій їх застосування. Зважаючи на це, у справі пожежогасіння залишається актуальним завдання пошуку і дослідження вогнегасних речовин. Вибір тих чи інших засобів та способів гасіння пожеж, а також вогнегасних речовин здійснюють окремо для кожного конкретного випадку,

і правильність цього вибору залежить від масштабів горіння, фізико-хімічних особливостей речовин і матеріалів, що горять, а також від стадій розвитку пожежі. Універсальних ефективних вогнегасних засобів не існує. З огляду на це під час вибору засобів пожежогасіння слід керуватися простим правилом – досягнути якомога кращого вогнегасного ефекту за мінімальних витрат вогнегасної речовини. Також важливо мати інформацію про



фізико-хімічні параметри процесів, що відбуваються під час горіння різних речовин. Зрозуміти й адекватно пояснити ці процеси можна тільки ґрунтуючись на основних законах хімії [1], хімічної термодинаміки [2] та хімічної кінетики [3]. З іншого боку, для припинення процесу горіння однієї і тієї ж речовини можна використовувати різні вогнегасні засоби, однак ефективність гасіння пожежі у цьому разі буде різною. З огляду на зазначене проведення детальний аналіз сучасних досягнень в області застосування відомих вогнегасних засобів, що використовуються для гасіння осередків пожеж класу В, є актуальним, зокрема з погляду окреслення шляхів пошуку нових та вдосконалення вогнегасних речовин, що вже існують.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз останніх досліджень і публікацій показує, що всі нині відомі вогнегасні засоби за своїм вогнегасним ефектом поділяються на ті, що ізолюють осередок пожежі, знижують концентрацію окисника через розбавлення горючої суміші негорючими газами, охолоджують зону горіння та інтенсивно гальмують (інгібують) швидкість хімічних реакцій в полум'ї. Однак багато відомих із них є інертними щодо дії на полум'я, тобто здебільшого виявляють флегматизувальну дію. Окрім цих вогнегасних речовин, є вогнегасні засоби, які активно діють на полум'я, тобто виявляють інгібувальний (хімічний) ефект. Загалом здебільшого дія вогнегасних засобів на процес горіння часто є комбінованою з якимось одним домінуючим вогнегасним ефектом.

До сучасних вогнегасних засобів належать водні вогнегасні речовини, піноутворювачі загального та спеціального призначення, вогнегасні порошки загального та спеціального призначення, а також газові вогнегасні речовини. Останнім часом для запобігання виникненню пожеж класу В та для їх гасіння широко застосовують аерозольне подавання ВВР у полум'я [4]. Серед перелічених вогнегасних засобів значного поширення набули ВВР, які добре розчинні у воді солі лужних, лужноземельних та

перехідних металів, фосфатні солі амонію, комплексні солі калію та купруму чи калію і феруму тощо.

**Формулювання цілей дослідження.** Проведення детальний аналіз сучасних досягнень в області застосування водних вогнегасних речовин для гасіння осередків пожеж класу В, виявлення їх переваг чи недоліків та окреслення шляхів пошуку нових, удосконалення ВВР, що існують.

**Методи дослідження.** Для цілеспрямованого пошуку нових та вдосконалення ВВР, що існують, здійснено порівняльний аналіз вогнегасної ефективності відомих на сьогодні ВВР, проведено узагальнення способів приготування їх водних розчинів та розглянуто взаємозв'язок між вогнегасною ефективністю та концентрацією ВВР.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** На сьогодні вода, завдяки своїй дешевизні та доступності, вважається найпоширенішим засобом гасіння пожеж. Здатність ефективно поглинати теплове випромінювання, термічна стійкість, можливість тривалого зберігання без зміни фізико-хімічних властивостей, а також легкість транспортування, екологічна чистота, відсутність шкідливого впливу на людину, доступність, дешевизна тощо – це переваги застосування води в пожежогаєнні. Разом із цим вогнегасну ефективність води можна суттєво посилити (тобто зменшити витрати води на одиницю площі пожежі), якщо використовувати дрібно розприскану воду [5–6]. Водночас підвищений охолоджувальний ефект дрібно розприсканої води досягається зазвичай збільшенням сумарного коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  і зменшенням часу нагрівання краплі  $\tau_k$  внаслідок збільшення загальної площі поверхні водяних крапель. Функціональна залежність параметрів  $\alpha$  ( $\text{Вт}/\text{м}^2\cdot\text{К}$ ) і  $\tau_k$  (с) від дисперсності крапель  $d$  (мм) наведені на рис. 1. Отже, теплообмін між полум'ям і водою суттєво зростає зі зменшенням розмірів водяних крапель та збільшенням швидкості їх руху у факелі полум'я.

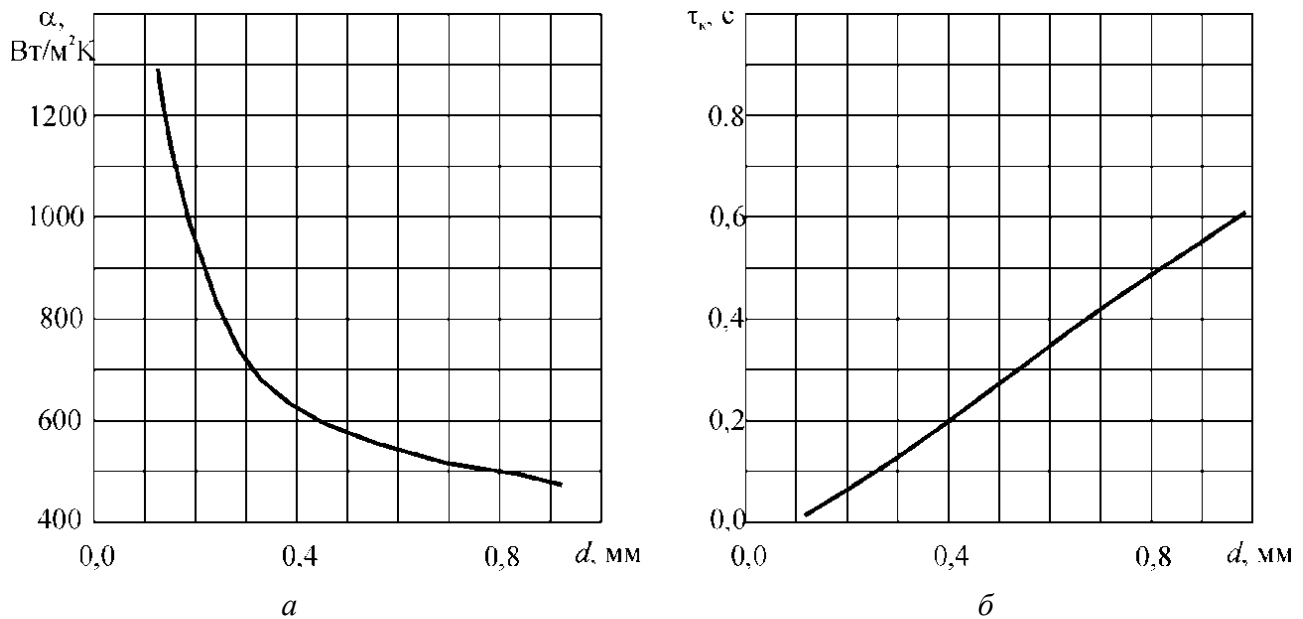


Рисунок 1 – Залежність коефіцієнта тепловіддачі (а) і часу нагрівання (б) води від дисперсності водяних крапель

Окрім охолоджувального, ізолювального вогнегасного ефекту води можна також посилювати за допомогою додавання поверхнево-активних речовин (далі – ПАР) задля отримання піни [7].

Проте вода зовсім не здатна виявляти інгібувальну дію на полум'я, тобто вона залишається хімічно інертною до більшості горючих речовин та матеріалів. Однак вчені у всьому світі не залишають спроб проводити пошукові дослідження, спрямовані на отримання альтернативних водних вогнегасних засобів, які б не поступалися їй в економічності, зручності у використанні і транспортуванні та були б екологічно прийнятними і водночас здатними хімічно діяти на полум'я. У світовій практиці протипожежного захисту об'єктів різного призначення великого поширення набувають технології розприскування водних вогнегасних речовин, які спроможні найповніше

забезпечувати реалізацію унікальних фізико-хімічних властивостей води та інгібувальної функції розчинених у воді солей [8–9].

Як розчинені у воді вогнегасні речовини, інгібітори горіння, найчастіше використовують солі лужних, лужноземельних металів та амонію [4]. Більшість цих речовин є добре розчинними у воді і тому в процесі гасіння пожеж їх можна використовувати як концентровані водні розчини [10]. Зокрема, в роботі [11] була досліджена вогнегасна здатність деяких неорганічних солей калію. Кореляційну залежність між інгібувальною та вогнегасною здатністю розчинених у воді солей калію і їх концентрацією показано на рис. 2а. Ці дослідження лягли в основу розроблення водних вогнегасних речовин на основі  $K_2CO_3$  [12] та  $KNO_3$  [13] для гасіння пожеж класу А і В.

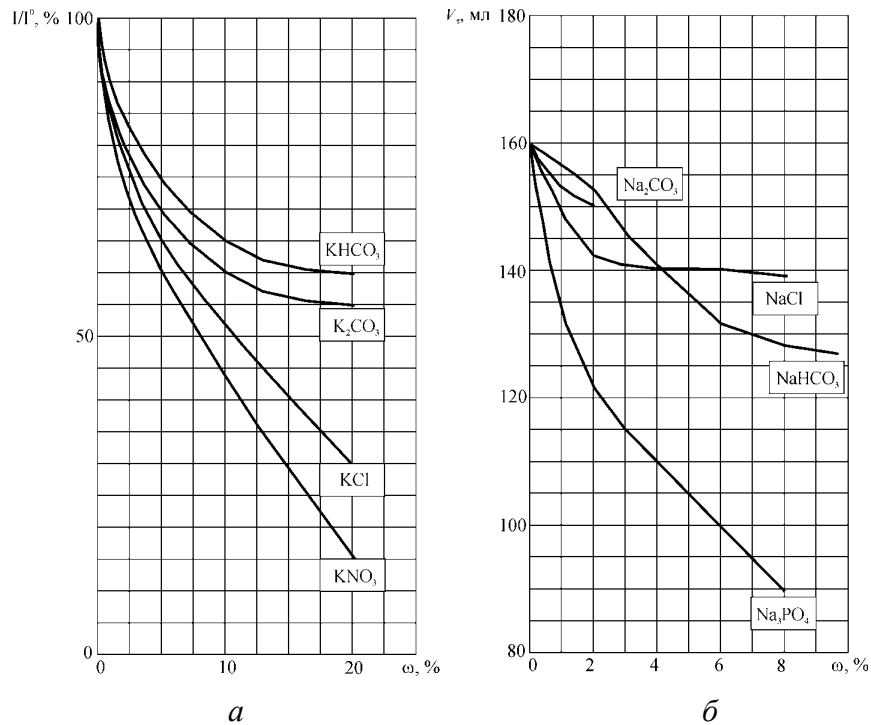


Рисунок 2 – Залежність інгібувальної здатності водних розчинів солей калію на горіння (а) та витрат водних розчинів солей натрію на гасіння займань (б) від їх концентрації

З метою підвищення ефективності гасіння осередків займань пропонується для використання водна вогнегасна композиція, виготовлення якої базується на взаємодії органічних кислот (ацетатної та лимонної) з неорганічним лугом (KOH) з додаванням таких речовин, як  $K_2CO_3$ ,  $KHCO_3$ ,  $K_4P_2O_7$ ,  $NaHCO_3$  тощо для стабілізації цих реакцій [14].

Привертають увагу науковців дослідження [15], які дали змогу виявити взаємозв'язок між вогнегасною здатністю виготовлених аерозолів водних розчинів солей лужних та лужноземельних металів (Li, Na, K, Mg, Ca тощо) від природи цих солей. Зокрема, на рис. 2б показана вогнегасна ефективність водних розчинів солей натрію як функція витрат розчинів цих солей від їх концентрації. Відомі також водні вогнегасні речовини, виготовлені з відходів титанового виробництва – розплавів хлоридів s-металів (KCl, NaCl,  $MgCl_2$ ) з незначними домішками хлоридів d-металів ( $MnCl_2$ ,  $CrCl_3$ ,  $FeCl_3$ ). Підвищення вогнегасної ефективності води досягається також у разі додавання до неї магній хлориду (2,5–20%), ортофосфатної кислоти та солей, які утворюються під час їхнього гідролізу. Тривалість гасіння полум'я можна також суттєво зменшити додаванням до води 2%

бури ( $Na_2B_4O_7$ ) і 0,32% боратної кислоти ( $H_3BO_3$ ). Також було показано, що у разі внесення в полум'я водного розчину, що містить 20–25% натрій хлориду, висота полум'я стрімко (за 3–5 с) зменшується. Цей інгібувальний ефект пояснюється безпосереднім потраплянням у зону горіння твердих частинок кухонної солі – NaCl, яка виділяється з розчину під час проходження краплин крізь полум'я. Аналогічна поведінка в полум'ї властива також водним розчинам деяких солей амонію –  $NH_4H_2PO_4$ ,  $(NH_4)_2HPO_4$ ,  $(NH_4PO_2)_n$ ,  $(NH_4)_2SO_4$ ,  $NH_4Cl$ ,  $(NH_4)_2C_2O_4$ , натрію – NaCl, NaF,  $NaHCO_3$ , калію – KBr, літію – LiF, барію –  $BaCl_2$  тощо. Перелічені солі характеризуються великими значеннями стандартних ентальпій утворення, через що під час термічного розкладання вони здатні поглинати значну кількість теплової енергії, що виділяється під час горіння.

Недоліком більшості вказаних водних вогнегасних речовин є те, що як розчинені солі використовують солі s-металів та амонію, які здатні призупиняти процеси горіння в основному за рахунок поглинання теплової енергії полум'я, а процедура приготування таких розчинів подекуди є вкрай складною. Крім того, ряд приготованих водних розчинів солей

мають значення  $pH \geq 12$ , що характеризує їх як хімічно небезпечні, корозійні та шкідливі для довкілля.

Що ж до солей калію, то автори роботи [16] показали, що калій карбонат ( $K_2CO_3$ ) виявився доволі ефективною домішкою для підвищення вогнегасної дії води. Так, за вмісту солі 1%, 2% і 5% ефективність пожежогасіння водними розчинами  $K_2CO_3$  порівняно з чистою водою зростає відповідно на 37,6%, 47,2% і 64,8%. Якщо розглядати інші солі калію, то можна спостерігати зменшення ефективності в ряді  $K_2C_2O_4 > CH_3COOK > KNO_3 > KCl > KH_2PO_4$ , що пояснюється утворенням різних активних частинок під час термічного розкладання цих солей.

Результати досліджень, наведені у роботі [17], показали, що використання 10% розчину  $KHCO_3$  скорочує середній час гасіння горіння гептану до 96% порівняно з чистою водою (від 154,6 с для води до 5,5 с для ВВР). Автори також стверджують, що водні розчини хлоридів перехідних металів ( $MnCl_2$ ,  $CuCl_2$ ,  $ZnCl_2$ ) є менш ефективними вогнегасними засобами, ніж розчини солей лужних металів. А 3% водні розчини  $(NH_4)_2HPO_4$ ,  $(NH_2)_2CO$  і  $FeSO_4$  навпаки збільшували час, необхідний для гасіння полум'я.

У роботі [18] зазначено, що ВВР на основі органічних солей лужних металів ( $K_2C_2O_4$ ,  $CH_3COOK$ ) є більш ефективними вогнегасними засобами, аніж їхні неорганічні аналоги ( $KCl$ ,  $KHCO_3$ ) чи сполуки фосфатної кислоти ( $K_3PO_4$ ,  $NH_4H_2PO_4$ ,  $H_3PO_4$ ). Автори також вважають, що вогнегасна ефективність хімічної домішки залежить від її хімічної природи, тривалості перебування в зоні горіння і складу продуктів розкладання.

Привертають увагу публікації, які стосуються розроблення нових вогнегасних речовин на основі солей перехідних металів [19–20]. Зокрема, як ВВР часто використовують такі солі *d*-металів, як  $CoCl_2$ ,  $NiCl_2$ ,  $MnCl_2$ ,  $FeCl_2$  тощо. Виявилось, що деякі з цих солей є більш ефективними інгібіторами горіння, аніж добре відомі всім хладони –  $CF_3Br$ . Ефективність придушення полум'я аерозолями водних розчинів солей перехідних металів забезпечується особливими хімічними властивостями цих металів як акцепторів електронів чи акцепторів хімічних радикалів, що утворюються в полум'ї. Саме ця особливість надає цим водним вогнегасним композиціям здатність ефективно призупиняти поширення полум'я [21].

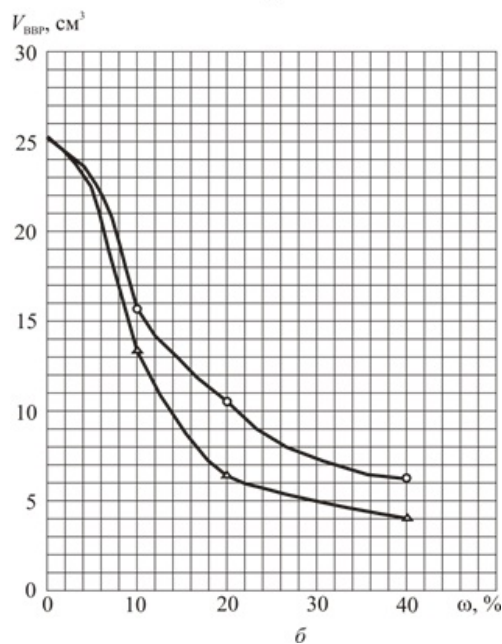
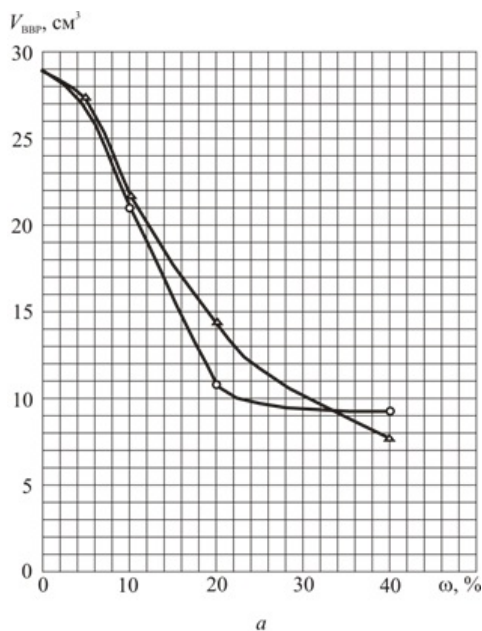


Рисунок 3. – Об'єм витраченої водної вогнегасної речовини від її масової концентрації на гасіння горіння гексану (а) та моноетаноламіну (б) (Δ – розчини  $CuCl_2$ ; ○ – розчини  $K_2[CuCl_4]$ )

Відповідно до нещодавно проведених експериментальних досліджень доволі перспективними речовинами, які можна використовувати для створення ВВР, є неорганічні солі купруму(II). Серед цього класу ВВР особливої уваги заслуговує концентрований водний розчин купрум(II) хлориду, а саме – 40% водний розчин  $\text{CuCl}_2$ , який під час гасіння осередків займає класу В (дизельне пальне) показав неабияку ефективність [22]. Так, зважаючи на вогнегасні випробування концентрованого водного розчину  $\text{CuCl}_2$ , гасіння горіння дизельного пального цією ВВР виявилось у 26 разів більш ефективним, ніж водою. Вогнегасна ефективність 40% водного розчину  $\text{CuCl}_2$  є наслідком особливої поведінки хлориду купруму(II) в полум'ї [23], адже після потрапляння аерозолу водного розчину  $\text{CuCl}_2$  в зону горіння розпочинаються складні фізико-хімічні перетворення, які призводять до переривання ланцюгових реакцій в полум'ї.

Ще однією відомою ВВР є комплексна сіль калію і купруму –  $\text{K}_2[\text{CuCl}_4]$ . Експериментальні дослідження довели, що у разі гасіння горіння моноетаноламіну вогнегасна здатність 40% водного розчину калій тетрахлокоупрату(II) у 4,2 раза вища, ніж у води, а якщо зіставляти результати випробувань з гасіння горіння n-гексану, то вогнегасна здатність буде у 3,2 раза вищою, ніж у води [24].

На рис. 3 наведена кореляційна залежність вогнегасної ефективності ВВР на основі  $\text{CuCl}_2$  (а) та  $\text{K}_2[\text{CuCl}_4]$  (б) як функція об'єму витраченої ВВР на гасіння полум'я від їхньої концентрації. Як бачимо, в обох випадках вогнегасна ефективність ВВР значно залежить від концентрації розчиненої у воді солі, і за концентрацій солі купруму(II) менших за 5% їх вогнегасна ефективність практично нівелюється. Ось чому в роботі [17] повідомлялося, що водний розчин  $\text{CuCl}_2$  з невисокою концентрацією солі виявився малоєфективним вогнегасним засобом.

Доволі ефективними щодо придушення полум'я виявились водні розчини калій гексаціаноферату(II) –  $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  та калій гексаціаноферату(III) –  $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$

[25–26]. Зокрема, 30% водний розчин калій гексаціаноферату(III) доволі дієво придушує полум'я лісових пожеж. На жаль, використання  $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  як інгібітора горіння має один істотний недолік: вже за температури 350–400°C калій гексаціаноферат(III) розкладається з виділенням токсичних сполук  $\text{KCN}$  і газоподібного диціану  $(\text{CN})_2$ . На відміну від калій гексаціаноферату(III), купрум(II) хлорид термічно більш стійкий і може переходити у газоподібний стан за високих температур.

Як показали нещодавно проведені випробування [27], ВВР на основі неорганічної солі феруму(III), а саме – 40% водний розчин ферум(III) сульфату здатний ефективно придушувати поширення полум'я. Слід зазначити, що водний розчин цієї солі не містить токсичних продуктів розкладання. Автори встановили, що тривалість гасіння полум'я, зумовленого горінням неполярних вуглеводнів, аерозолем концентрованого водного розчину цієї солі становить 5 с, що у 4,9 раза ефективніше за водогінну воду. Водночас мінімальний об'єм витраченого 40% водного розчину  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  на повне припинення горіння становив 0,2 л/м<sup>2</sup>. Як бачимо, атоми перехідних металів і в цьому разі є акцепторами електронів, що й забезпечує цим вогнегасним композиціям високу здатність призупиняти поширення полум'я.

### **Висновки та напрями подальших досліджень.**

1. На сьогодні для гасіння пожеж та підвищення надійності протипожежного захисту різних промислових об'єктів використовують традиційні засоби пожежогасіння: дрібнодисперсну воду та водні вогнегасні речовини (в тому числі й піни), порошкові засоби пожежогасіння та вогнегасні аерозолі.

2. Основним складником, інгібітором горіння, в усіх цих засобах пожежогасіння є солі s-металів (хлориди, карбонати, фосфати лужних та лужноземельних металів та амонію), які здатні припиняти процес горіння винятково в полум'ї, механізм інгібування горіння яких і досі є дискусійним.

3. Однак, окрім традиційних солей-інгібіторів горіння, високу вогнегасну

ефективність здатні виявляти солі *d*-металів, які, крім спроможності гальмувати утворення активних радикалів безпосередньо в полум'ї, здатні також хімічно зв'язуватись з донорними гетероатомами (N, O, S тощо) органічних речовин, внаслідок чого ряд параметрів пожежонебезпеки таких вуглеводнів суттєво знижуються, що у підсумку і

забезпечує високу вогнегасну здатність розчинів таких солей.

4. У цьому плані дуже перспективними вогнегасними речовинами, які варто розробляти, є сполуки феруму, атоми металу яких виявляють неабияку електрондоноруючу спроможність стосовно електрондоноруючих гетероатомів різних горючих органічних речовин.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Михалічко Б. М. Курс загальної хімії. Теоретичні основи : монографія. Львів : Знання, 2009. 548 с.
2. Рябов І. Б., Сайчук І. В., Шаршанов А. Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі : навч. посіб. Харків : АПБУ, 2002. 355 с.
3. Ashmore P. G. Catalysis and Inhibition of Chemical Reactions. Butterworth, Washington : D.C., 1963. 375 p.
4. Вогнегасні речовини : посіб. / А. В. Антонов та ін. Київ : Пожінформтехніка. 2004. 176 с.
5. Дударев В. В., Горовых О. Г., Бардушко С. Н., Шмулевцов И. А., Бобрышева С. Н. Влияние дисперсности распыленной воды на интенсивность ее подачи при тушении пожара в закрытом объеме. *Науковий вісник УкрНДППБ*. 2009. Т. 19. № 1. С. 149–157.
6. Абрамов Ю. А., Бесараб С. Н., Садковой В. П. Условия и временные характеристики тушения пожара класса В распыленной водой. *Проблемы пожарной безопасности*. 2011. Вып. 30. С. 3–7.
7. Ковалишин В. В., Васильева О. Е., Козяр Н. М. Пінне гасіння. Львів : Сполом, 2007. 168 с.
8. Турчин А. І., Антонов А. В. Теоретичні і практичні питання застосування технологій тонкого розпилювання водних вогнегасних речовин. *Науковий вісник УкрНДППБ*. 2008. Т. 17. № 1. С. 138–145.
9. Коврегін В. В., Калугін В. Д., Кустов М. В., Сидоренко О. В. Повышение эффективности пожаротушающих составов на основе воды за счет добавок различных реагентов. *Вісник ЛДУБЖД*. 2010. № 4. Ч. 1. С. 136–142.
10. Турчин А. І., Боровиков В. О., Антонов А. В., Козяр Н. М. Дослідження з визначення показників якості деяких водних вогнегасних речовин. *Науковий вісник УкрНДППБ*. 2008. Т. 18. № 2. С. 110–115.
11. Водопінна вогнегасна речовина на основі фторсинтетичного плівкоутворювального піноутворювача : пат. 4340 Україна : МПК А62D1/02. № у 2009 03835 ; заявл. 21.04.2009; опубл. 10.08.2009. Бюл. № 15.
12. Водна вогнегасна речовина для гасіння тонкорозпиленними струменями пожеж класів «А» та «В» за ГОСТом 27331-87 з використанням від –30 до +50°C : пат. 52969 Україна : МПК А62D 1/02. № у 2009 11293; заявл. 06.11.2009 ; опубл. 27.09.2009. Бюл. № 18.
13. Водна вогнегасна речовина для гасіння тонкорозпиленними струменями пожеж класів «А» та «В» за ГОСТом 27331-87 : пат. 96797 Україна : МПК А62D 1/02. № а 2009 11271 ; заявл. 06.11.2009 ; опубл. 12.12.2011. Бюл. № 23.
14. Антипіренова композиція та спосіб її одержання : пат. 84683 Україна : МПК С09К 21/00, А62D 1/00, А62D 1/06. № а 2005 01765 ; заявл. 05.08.2003; опубл. 25.11.2008; Бюл. № 22.
15. Дяченко О. І., Биченко А. О. Залежність вогнегасної ефективності води від її хімічного складу. *Пожежна безпека : теорія і практика*, 2008. № 1. С. 36–39
16. Zhang Tianwei, Liu Hao, Han Zhiyue, Du Zhiming, Wang Yong. Active substances study in fire extinguishing by water mist with potassium salt additives based on thermoanalysis and thermodynamics. *Applied Thermal Engineering*, 2017. Vol. 122. P. 429–438.
17. Joseph P., Nichols E., Novozhilov V. A comparative study of the effects of chemical additives on the suppression efficiency of water mist. *Fire Safety Journal*. 2013. Vol. 58. P. 221–225.
18. Ming-Hui Feng, Jun-Jun Tao, Jun Qin and Qin Fei. Extinguishment of counter-flow diffusion flame by water mist derived from aqueous solutions containing chemical additive. *Journal of Fire Sciences*. 2016. Vol. 34(1). P. 51–68.
19. Linteris G. T., Knyavev V. D., Babushok V. I. Inhibition of premixed methane flames by manganese and tin compounds. *Combustion and Flame*. 2002. Vol. 129(3). P. 221–238.
20. Linteris G. T., Rummingier M. D., Babushok V. I. Catalytic inhibition of laminar flames by transition metal compounds. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2008. Vol. 34(3). P. 288–329.
21. Linteris G. T., Katta V. R., Takahashi F. Experimental and numerical evaluation of metallic compounds for suppressing cup-burner flames. *Combustion and Flame*. 2004. Vol. 138 (1–2). P. 78–96.
22. Mykhalitchko B., Lavrenyuk H., Mykhalitchko O. New water-based fire extinguishant: elaboration, bench-scale tests, and flame extinguishment efficiency determination by cupric chloride aqueous solutions. *Fire Safety Journal*. 2019. Vol. 105. P. 188–195.
23. Карвацька М. Я., Лавренюк О. І., Пархоменко В.-П. О., Михалічко Б. М. Квантово-хімічне моделювання інгібувального впливу водних розчинів неорганічних солей купруму(II) на горіння вуглеводнів. *Вісник ЛДУБЖД*. 2021. № 23. С. 33–38.
24. Korobeinichev O. P., Shmakov A. G., Chernov A. A., Bol'shova T. A., Shvartsberg V. M., Kutsenogii K. P., Makarov V. I. Fire suppression by aqueous solutions salts aerosols. *Combustion Explosion and Shock Waves*. 2010. Vol. 46. № 1. P. 16–20.
25. Korobeinichev O., Shmakov A., Chernov A., Bolshova T., Terenteva Ya., Borisov G. The influence of K<sub>4</sub>[Fe(CN)<sub>6</sub>] aerosol on the flame speed of methane-air flame. *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 62. P. 331–336.
26. Водна вогнегасна речовина K<sub>2</sub>[CuCl<sub>4</sub>] : пат. 108792 Україна : МПК А62D 1/00. № а 2013 12708 ; заявл. 31.10.2013 ; опубл. 10.06.2015. Бюл. № 11.
27. Карвацька М. Я., Пастухов П. В., Петровський В. Л., Лавренюк О. І., Михалічко Б. М. Вогнегасні випробування концентрованого водного розчину ферум(III) сульфату. *Пожежна безпека*. 2022. № 40. С. 55–60.

REFERENCES

1. Mykhalichko, B. (2009). *Kurs zahalnoi khimii. Teoretychni osnovy* [Course of general chemistry. Theoretical foundations]. Lviv: Znannia [in Ukrainian].
2. Ryabov, I. B., Saychuk, I. V., & Sharshanov, A. Ya. (2002). *Termodinamika i teploperedacha u pozhezhnii spravi* [Thermodynamics and heat transfer in firefighting]. Kharkiv: APBU [in Ukrainian].
3. Ashmore, P. (1963). *Catalysis and Inhibition of Chemical Reactions*. Butterworth, Washington: D.C. [in English].
4. Antonov, A. V., Borovykov, O. V., Orel, V. P., Zhartovskiy, V. M., Kovalyshyn, V. V. (2004). *Vohnehasni rechovyny* [Fire extinguishing agents]. Kyiv: *Pozhinformtekhnik* [in Ukrainian].
5. Dudarev, V. V., Horovykh, O. H., Bardushko, S. N., Shmulevtsov, Y. A., Bobrysheva, S. N. (2009). Vlyaniye dyspersnosti raspylennoi vody na yntensyvnost ee podachy pry tushenyy pozhara v zakrytom obeme [Effect of dispersion of sprayed water on the intensity of its delivery when extinguishing a fire in a closed volume]. *Naukovyi visnyk UkrNDIPB*, 19, (1), 149–157. [in Ukrainian].
6. Abramov, Yu. A., Besarab, S. N., Sadkovoy, V.P. (2011). Usloviya i vremennyye kharakteristiki tusheniya pozhara klassa B raspylennoy vody [Conditions and temporal characteristics of extinguishing a class B fire with sprayed water]. *Problemy pozharney bezopasnosti*, 30, 3–7. [in Ukrainian].
7. Kovalyshyn, V. V., Vasylieva, O. E., & Kozyar, N. M. (2007). *Pinne hasynnya* [Foam extinguishing]. Lviv: Spolom [in Ukrainian].
8. Turchyn, A. I., Antonov, A. V. (2008). Teoretychni i praktychni pytannya zastosuvannya tekhnolohiy tonkoho rozpylyuvannya vodnykh vohnehasnykh rechovyn [Theoretical and practical issues of application of technologies of fine spraying of water-based fire extinguishing agents]. *Naukovyi visnyk UkrNDIPB*, 17 (1), 138–145. [in Ukrainian].
9. Kovregin, V. V., Kalugin, V. D., Kustov, M. V., Sidorenko, O. V. (2010). Povysheniye effektivnosti pozharotushashchikh sostavov na osnove vody za set dobavok razlichnykh reagentov [Increasing the effectiveness of fire-extinguishing compositions based on water by adding various reagents]. *Visnyk LDUBZHD*, 4 (1), 136–142. [in Ukrainian].
10. Turchyn, A. I., Borovykov, V. O., Antonov, A. V., Koziar, N. M. (2008). Doslidzhennia z vyznachennia pokaznykiv yakosti deiakykh vodnykh vohnehasnykh rechovyn [Research on determination of quality indicators of some aqueous extinguishing agents]. *Naukovyi visnyk UkrNDIPB*, 2, 110–115. [in Ukrainian].
11. Kovalyshyn, V. V., Turchyn, A. I., Antonov, A. V., Kozyar, N. M. (2009). *Vodopinna vohnehasna rechovyna na osnovi fiorsyntetychnoho plivkoutvoryvalnogo pinoutvoryuvacha* [Water-foaming extinguishing agent based on fluorosynthetic film-forming foaming agent]. Patent Ukr, no. 43403.
12. Antonov, A. V., Kovalyshyn, V. V., Turchyn, A. I., Kozyar, N. M. (2009). *Vodna vohnehasna rechovyna dlya hasynnya tonkorozpylenymy strumenyamy pozhezh klasiv «A» ta «B» za HOSTom 27331-87 z vykorystannyam vid –30 do +50 °C* [Water-based extinguishing agent for extinguishing fires of classes «A» and «B» according to GOST 27331-87 with fine spray jets at temperatures from -30 to +50 °C]. Patent Ukr, no. 52969.
13. Antonov, A. V., Kovalyshyn, V. V., Turchyn, A. I., Vaysman, M. N., Kozyar, N. M. (2011). *Vodna vohnehasna rechovyna dlya hasynnya tonkorozpylenymy strumenyamy pozhezh klasiv «A» ta «B» za HOSTom 27331-87* [Aqueous extinguishing agent for extinguishing fires of classes «A» and «B» according to GOST 27331-87 with fine spray jets]. Patent Ukr, no. 96797.
14. Nilsson, Yens Birger. (2008). *Antypirenova kompozytsiya ta sposib yiyi oderzhannya* [Fire retardant composition and method of its preparation]. Patent Ukr, no. 84683.
15. Diachenko, O. I., Bychenko, A. O. (2008). Zalezhnist vohnehasnoi efektyvnosti vody vid yii khimichnoho skladu [Dependence of fire extinguishing efficiency of water on its chemical composition]. *Pozhezhna bezpeka: teoriia i praktyka*, 1, 36–39. [in Ukrainian].
16. Zhang, T., Liu H., Han Z., Du Z., Wang Y. (2017) Active substances study in fire extinguishing by water mist with potassium salt additives based on thermoanalysis and thermodynamics. *Applied Thermal Engineering*, 122, 429–438. [in English].
17. Joseph, P., Nichols, E., Novozhilov, V. (2013). A comparative study of the effects of chemical additives on the suppression efficiency of water mist. *Fire Safety Journal*, 58, 221–225. [in English].
18. Ming-Hui, Feng, Jun-Jun, Tao, Jun, Qin and Qin Fei. (2016). Extinguishment of counter-flow diffusion flame by water mist derived from aqueous solutions containing chemical additive. *Journal of Fire Sciences*, 34 (1), 51–68. [in English].
19. Linteris, G. T., Rumminger, M. D., Babushok, V. I. (2008). Catalytic inhibition of laminar flames by transition metal compounds. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34 (3), 288–329. [in English].
20. Linteris, G.T., Rumminger, M.D., Babushok, V.I. (2008). Catalytic inhibition of laminar flames by transition metal compounds. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34 (3), 288–329. [in English].
21. Linteris, G.T., Katta, V.R., Takahashi, F. (2004). Experimental and numerical evaluation of metallic compounds for suppressing cup-burner flames. *Combustion and Flame*, 138 (1-2), 78–96. [in English].
22. Mykhalichko, B., Lavreniuk, H., Mykhalichko, O. (2019). New water-based fire extinguishant: elaboration, bench-scale tests, and flame extinguishment efficiency determination by cupric chloride aqueous solutions. *Fire Safety Journal*, 105, 188–195. [in English].
23. Karvatska, M. Ia., Lavreniuk, O. I., Parkhomenko, V.-P. O., Mykhalichko, B. M. (2021). Kvantovo-khimichne modeliuвання inhibovalnoho vplyvu vodnykh rozchyniv neorhanichnykh solei kuprumu(II) na horinnia vulevodniv [Quantum-chemical modeling of the inhibitory effect of aqueous solutions of inorganic copper(II) salts on the combustion of hydrocarbons]. *Visnyk LDUBZHD*, 23, 33–38. [in Ukrainian].
24. Korobeinichev, O. P., Shmakov, A. G., Chernov, A. A., Bol'shova, T. A., Shvartsberg, V. M., Kutsenogii, K. P., Makarov, V. I. (2010). Fire suppression by aqueous solutions salts aerosols. *Combustion Explosion and Shock Waves*, 46 (1), 16–20. [in English].
25. Korobeinichev, O., Shmakov, A., Chernov, A., Bolshova, T., Terenteva, Ya., Borisov, G. (2013). The influence of K<sub>4</sub>[Fe(CN)<sub>6</sub>] aerosol on the flame speed of methane-air flame. *Procedia Engineering*, 62, 331 – 336. [in English].
26. Mykhalichko B. M., Hodovanets' N. M., Mykhalichko O. B. *Vodna vohnehasna rechovyna K2[CuCl4]*. Patent na vynakhid № 108792. Ukrayina. MPK A62D 1/00. № a 2013 12708, zayavl. 31.10.2013, opubl. 10.06.2015, Byul. № 11.
27. Karvatska, M. Ia, Pastukhov, P. V., Petrovskiy, V. L., Lavreniuk, O. I., Mykhalichko, B. M. (2022). *Vohnehasni vyprobuvannya kontsentrovanoho vodnoho rozchynu ferum(III) sulfate* [Fire extinguishing tests of a concentrated aqueous solution of ferric(III) sulfate]. *Pozhezhna bezpeka*, 40, 55–60. [in Ukrainian].

## CURRENT STATUS AND DIRECTIONS FOR THE IMPROVEMENT OF AQUEOUS FIRE-EXTINGUISHING AGENTS

*M. Karvatska, O. Lavreniuk, B. Mykhalichko*

*Lviv State University of Life Safety, Ukraine*

---

**KEYWORDS:**

aqueous  
fire-extinguishing  
agents, combustion  
inhibitors, inorganic  
salts, aerosol  
fire-extinguishment

**ANNOTATION**

One of the urgent problems in the field of fire extinguishing is the search and research of new and improvement of existing fire extinguishing agents, since the effectiveness of fighting fires largely depends on the quality of fire extinguishing substances and their application technologies. In order to design ways to find new and improve existing fire extinguishing agents, it is necessary to carry out a detailed analysis of modern achievements in the field of application of known fire extinguishing agents used to extinguish class B fires, to identify their advantages and disadvantages. In world practice, to prevent the occurrence of class B fires and to extinguish them, aerosol supply of aqueous fire-extinguishing agents (AFEAs) to the flame is widely used. Therefore, the work focused on a comparative analysis of the fire-extinguishing efficiency of currently known AFEA, summarized the methods of preparing their aqueous solutions, and considered the relationship between fire-extinguishing efficiency and concentration of AFEA. The analysis of the current state has shown that, for extinguishing class B fires and increasing the reliability of fire protection of various industrial facilities, aerosol supply of AFEAs based on various salts of *s*-metals and ammonium is traditionally used. The main component (the combustion inhibitor) in all these AFEAs are chlorides, carbonates, phosphates of alkaline and alkaline earth metals and ammonium, which are able to stop the burning process exclusively in the flame according to the mechanism of combustion inhibition that has not yet been clarified. In addition to traditional salts-inhibitors of combustion, salts of *d*-metals, which are able to inhibit the formation of active radicals directly in the flame, can show high fire-extinguishing efficiency. In this regard, concentrated aqueous solutions of inorganic salts of *d*-metals are very promising AFEAs that are worth developing.



УДК 614.8:574.2

## УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ ВИНИКНЕННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ, ПОВ'ЯЗАНИХ ІЗ ЗАТОПЛЕННЯМ ТЕРИТОРІЙ НА РІВНІ ОБ'ЄДНАНИХ ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ГРОМАД

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1.101-109>

Гаврись А. П. ORCID iD 0000-0003-2527-7906  
Яковчук Р. С.\* ORCID iD 0000-0001-5523-5569  
Стародуб Ю. П. ORCID iD 0000-0002-1947-7197  
Тур Н. Ю., ORCID iD 0000-0002-0557-5351  
\*E-mail: yakovchukrs@ukr.net

*Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна*

### ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

*Надійшла до редакції: 24.04.2023*  
*Пройшла рецензування: 04.05.2022*

### КЛЮЧОВІ СЛОВА:

цивільний захист, управління проектами, надзвичайні ситуації, модель управління, заходи захисту.

### АНОТАЦІЯ

Проаналізовано останні дослідження та публікації з функціонування організаційного механізму державного управління ризиками виникнення надзвичайних ситуацій, аспекти управління ризиками на об'єктовому рівні підприємств, установ та організацій, закордонний досвід минулих та поточних ініціатив на рівні громади чи місцевого рівня щодо управління ризиками надзвичайних ситуацій, стратегію спільного управління ризиками зсувів та повеней для поселень в провідних країнах і «країнах третього світу», моделі та механізми реалізації проектів захисту територій від затоплення та сучасні аспекти реалізації державної політики у сфері безпеки життєдіяльності територіальних громад, де держава в процесі децентралізації органів місцевого самоврядування делегує свої повноваження забезпечення безпеки життєдіяльності. Дійшли висновку, що на сьогодні розроблено моделі управління ризиками виникнення надзвичайних ситуацій лише на державному рівні, а на інших, зокрема рівні об'єднаних територіальних громад, зазначені механізми не випрацьовувалися. Автори розробили модель управління ризиками виникнення затоплення територій на рівні об'єднаної територіальної громади, яка включає процес аналізу територій, що поділяється на вісім етапів, та процес погодження, що складається з трьох кроків. Для вказаних етапів і кроків надано рекомендації щодо їх виконання з можливими прикладами реалізації. Додатково наведено таблицю-приклад виконання другого етапу аналізу територій, що наочно демонструє очікуваний результат від його виконання. Крім того, детально описано процес погодження з керівництвом громади та мешканцями вибраного внаслідок аналізу проекту, а також підготовку його до затвердження. Цей процес складається з: інформування мешканців громади про результати аналізу, розроблення детальних кроків реалізації проекту та визначення можливих джерел фінансування.

### Постановка проблеми.

В аналітичній доповіді національної ради з розвідки США «Глобальні тенденції 2030: альтернативні світи» [1] визначені потенційні небезпеки, які можуть спричинити максимальну руйнівну дію. Однією з головних загроз міжнародній безпеці є зміна клімату. Зростання температури океанів і зменшення кількості

снігу і льоду зумовили підвищення рівня моря. У період з 1901 по 2010 роки внаслідок збільшення кількості води в океанах середньосвітовий рівень моря піднявся на 19 см, що спричинено загальним потеплінням і таненням льодовиків. Кожне десятиліття, починаючи з 1979 року, площа арктичних морських льодів скорочується на 1,07 мільйона

квадратних кілометрів, а рівень води в усіх водних артеріях постійно збільшується [1–2]. Це призводить до виникнення затоплення територій, що з кожним роком стають масштабнішими.

Зміна клімату порушує економічний розвиток країн і має абсолютно вимірювані фінансові наслідки, які з кожним роком тільки зростають. З іншого боку очевидно, що сьогодні зростає усвідомлення того, що способи вирішення проблеми і виходу із ситуації існують не тільки на рівні держави чи області, а й на місцевому рівні, а саме – рівні об'єднаних територіальних громад (далі – ОТГ). Проте процес децентралізації в Україні розпочався лише нещодавно і новостворені громади потребують організаційної та методичної допомоги для початку реалізації проектів захисту територій від затоплення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В роботах [3–5] розглянуто аналіз та оцінку особливостей функціонування організаційного механізму державного управління ризиками виникнення надзвичайних ситуацій в Україні. Автори зосередилися на визначенні та побудові державної моделі управління ризиками, не беручи до уваги нижчі адміністративні рівні. Водночас у статтях [6–8] автори розглядають аспекти управління ризиками на об'єктовому рівні підприємств, установ та організацій і не зважають на вплив органів місцевого самоврядування або держави.

Автори наукової роботи [9] довели доцільність імплементації європейської партисипативної моделі управління об'єднаними територіальними громадами як засобу формування їх локальної безпеки, активізації та акумулювання внутрішніх можливостей розвитку. Висновки статті здебільшого стосуються економічної складової безпеки, а не безпеки з погляду цивільного захисту населення, проте для повноти дослідження проаналізуємо закордонний досвід.

У статті [10] автор зробив огляд минулих та поточних ініціатив на рівні громад чи місцевого рівня щодо управління ризиками надзвичайних ситуацій, без будь-яких наукових досліджень та прив'язок до конкретних регіонів. Як висновок, автор наголошує на

тому, що проекти захисту на рівні громад працюють ефективніше, ніж загальнодержавні в довготривалій перспективі. Статті [11–12] висвітлюють стратегію спільного управління ризиками зсувів та повеней для поселень у Латинській Америці та Східній Африці відповідно. В цих працях автори розглядають поселення як найнижчий рівень організаційної структури з мінімальними можливостями для реалізації будь-яких проектів. Досвід «країн третього світу» не зовсім прийнятний для України з огляду на інтеграцією в Європейський Союз та запровадження реформ територіальних органів.

У статті [13] автори аналізують управління ризиками в маленькому містечку в Австралії та доходять висновку, що поточна політика пом'якшення наслідків повеней, ймовірно, буде неадаптивною через непередбачені наслідки, які зрештою знижують ефективність заходів у довгостроковій перспективі. Крім того, інтегроване управління ризиками повеней, яке здійснюється за допомогою цілеспрямованих активних інвестицій, таких як інвестиції в інфраструктуру; досягнення сучасних технологій; підвищення потужності; зміни в системах, методах управління та поведінці, а також варіантах страхування ризику надають можливості для зменшення майбутніх витрат на надання допомоги та відновлення, а також підвищення фінансової стабільності та довгострокового добробуту громад перед ризиками повеней. Концептуалізація та візуалізація системи ризиків повеней дає розуміння, яке може допомогти скерувати більш економічно ефективні та стійкі інвестиції в пом'якшення ризиків повеней у громадах, схильних до повеней. Проте автори не описують детально механізм дій громад для реалізації таких проектів чи альтернативні підходи до вирішення заявленої проблеми.

У статтях [14–15] описуються моделі та механізми реалізації проектів захисту територій від затоплення, проте автори не наводять спосіб застосування цих методів на рівні ОТГ.

У праці А. Рогулі [16] досліджуються сучасні аспекти реалізації державної політики у сфері безпеки життєдіяльності територіальних громад та окреслюється роль управління, де держава в процесі децентралізації органів місцевого самоврядування делегує свої повноваження забезпечення безпеки життєдіяльності населення на місцевий рівень. На основі дослідження автор пропонує шляхи вирішення проблем, які виникають під час реалізації державної політики у сфері цивільного захисту. Як вказано в статті, необхідні подальші та глибші дослідження в цьому напрямі, оскільки він тільки починає функціонувати. У статті [17] автор проводить детальний аналіз ефективності діяльності органів місцевого самоврядування з організації безпеки життєдіяльності територіальних громад на основі економетричного моделювання. Проте у зазначеному аналізі не враховано ефективність забезпечення безпеки з реалізацією проєктів захисту територій від природних та техногенних чинників суб'єктами господарювання або волонтерськими організаціями.

**Формулювання цілей дослідження.** Метою дослідження є розроблення моделі управління ризиками виникнення затоплення територій на рівні об'єднаних територіальних громад з урахуванням особливостей взаємодії з мешканцями, суб'єктами господарювання та іншими службами громади. До кожного етапу надати рекомендації щодо його виконання з можливим прикладами їх реалізації. Детально описати процес погодження проєкту, що був вибраний внаслідок аналізу, та підготовку його до затвердження.

**Методи дослідження.** Теоретико-методологічну основу дослідження склали загальнонаукові принципи та фундаментальні положення управління проєктами з проблем розроблення заходів управління ризиками, прогнозування втрат, невизначеності проєктного середовища. У процесі проведення дослідження

використані методи системного та структурного аналізу – для вивчення предметної області системи попередження надзвичайних ситуацій та проведення порівняльного аналізу відомих моделей і розроблення нових.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Існує багато методів захисту території та населення від затоплення. Для того щоб визначити, чи один із підходів на рівні громади успішно вирішить локалізовані проблеми повені, необхідно провести аналіз території. Аналіз території – це початковий етап проєкту, який включає план виконання інженерно-технічних заходів на відносно невеликій частині території громади та очікувані результати від нього. Мета аналізу полягає в тому, щоб визначити, чи існує реальний і прийнятний спосіб зменшити шкоду від повені на рівні ОТГ. На основі статті [18], де проаналізовано структуру системи управління ризиками та її основні елементи, а також методіку управління ризиками надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру розроблено модель управління ризиками виникнення затоплення територій на рівні ОТГ, що наведена на рис. 1 Розглянемо детальніше процес аналізу територій на вразливість до затоплення.

Першим кроком в аналізі території є визначення меж району, вододілу або околиць, які необхідно перевірити. Немає стандартного чи оптимального розміру площі чи типової кількості задіяних будівель. Область для аналізу може містити одну будівлю, сто чи тисячу, за умови, що це територія суміжних об'єктів, які піддаються одному джерелу затоплення. Території, які піддаються місцевим дренажним проблемам і затопленням за межами нанесеної на карту зони особливої небезпеки затоплення, зазвичай будуть відносно невеликими. Ідеальний підхід полягає в тому, щоб почати з найбільш часто затоплюваних місць і окреслити дренажний басейн або підводний басейн, який стікає до них.



Рисунок 1 – Модель управління ризиками виникнення затоплення територій на рівні ОТГ

*Джерело: розробка авторів*

Це можна зробити за наявності відповідних топографічних карт. Іноді, наприклад на рівнинних ділянках або в районах, де є каналізаційна система, це може бути важко.

Територія має бути окреслена, де це можливо, щоб включити мікрорайони, які існують, навіть якщо це означатиме розширення меж району, що аналізується, за межі водозбірного басейну.

ОТГ потрібно провести аналіз території, окреслити всі локальні проблемні зони повені та встановити пріоритети для аналізу кожної по черзі. Окремою важливою частиною аналізу території є робота з власниками нерухомості. Доцільно визначити пріоритети для всіх дій, видатків і проєктів. Документування процесу встановлення пріоритетів може допомогти зберегти неупередженість планувальників і виправдати фінансування проєктів.

Визначаючи пріоритети напрямів, необхідно враховувати такі фактори:

– території з об'єктами, які внесені ДСНС України до списку небезпечних територій з погляду затоплення відповідно до [19];

– території, де мешканці активно звертаються по допомогу або які нещодавно були затоплені. Ці території, ймовірно, матимуть мотивованих,

зацікавлених власників нерухомості, які будуть готові співпрацювати з громадами;

– території, де затоплення становить найбільшу загрозу здоров'ю та безпеці, наприклад території, що зазнають раптових паводків або паводкових вод, що рухаються з великою швидкістю (потоком).

Громадам, які ще не мали досвіду з виконання подібних проєктів краще почати з менших ділянок, які легше аналізувати, а потім переходити до більших проблем у міру вдосконалення процедур і досвіду.

Метою аналізу є визначення, чи існує реальний і прийнятний спосіб зменшити шкоду від повені на рівні ОТГ. Потрібно залучити власників постраждалої нерухомості та рекомендується створити письмовий звіт, який показує процес, який було проведено, і обґрунтування висновків.

Проведення аналізу територій складається з п'яти етапів:

1. Інформування громади про майбутній аналіз.
  2. Визначення причини та ступеня проблеми.
  3. Перегляд альтернативних підходів захисту від затоплення на рівні району.
  4. Координація роботи з іншими службами щодо діяльності на вибраній території.
  5. Документування результатів аналізу.
- Розглянемо детальніше кожний етап.

Етап «Інформування громади про майбутній аналіз». Про те, що громада планує ініціювати аналіз території, необхідно повідомити мешканців та власників об'єктів в районі дослідження. Це повідомлення можна надіслати поштою або довести на публічних зборах. Цей етап має на меті висвітлити такі питання:

- поінформувати про причини аналізу та механізм його проведення;
- отримати інформацію про причини та наслідки минулих повеней. Це можна зробити використовуючи готові електронні форми у вигляді анкет, що надалі полегшить перегляд і підбиття підсумків. Важливо наголосити, що вся інформація, яка збирається у населення, буде у відкритому доступі, тому надання її є добровільним;
- повідомити, що польові бригади або геодезисти будуть працювати у районі дослідження в конкретні періоди (дати) і матимуть ідентифікаційні картки;
- повідомити дату, час і місце зустрічі, на якій будуть розглянуті результати аналізу, а також ім'я та номер телефону того, хто може відповісти на запитання.

Етап «Визначення причини та ступеня проблеми». Відповідальна особа громади має переглянути наявні дані,

наприклад: дослідження та звіти про повені на зазначеній території; плани каналізаційних мереж; топографічні карти або інші джерела інформації, які можуть бути корисні під час аналізу; відповіді на анкети та інформацію, що була надана мешканцями під час першого етапу; дані про страхові відшкодування від повеней, які містять дані про місце та дати повеней, а також розмір збитків і, звичайно, польові дослідження для виявлення або підтвердження забруднення зливових каналів або інших повідомлених причин затоплення.

Гідрологічне та гідравлічне дослідження не є обов'язковим на цьому етапі. Результатом другого етапу має бути розроблена таблиця (як приклад, наведена табл. 1) або карта з проблемними питаннями та можливими методами їх вирішення. Важливо пам'ятати, якщо проєкт створення дренажу виглядає дієвим заходом, необхідно буде провести гідрологічний та гідравлічний аналіз, щоб переконатися, що покращення має належний ефект. Дуже часто громади створюють дренажі без відповідних досліджень, що призводить до виникнення затоплення в іншому місці.

Таблиця 1 – Приклад результату виконання другого етапу у вигляді таблиці

Постановка проблеми	Методи вирішення
Чотири рази за останні 5 років сильні зливи забруднювали стічну канаву вздовж дороги М06 і затоплювали довколишні будинки. Канава з часом заповнилася осадом і більше не може переносити потоки води від сильних дощів	<ul style="list-style-type: none"> <li>– збільшити стічну канаву;</li> <li>– поглибити стічну канаву;</li> <li>– прочистити стічну канаву;</li> <li>– встановити підземну каналізацію</li> </ul>
Система зливової каналізації була спроектована та встановлена в 1950 році. На той час вона могла витримувати без очищення сильні зливи з верхнього водозбірного басейну протягом 10 років. Відтоді басейн урбанізувався, а кількість стічної води значно зросла. Стічна каналізація з часом зносилась, і тепер потребує очищення в середньому раз на 2 роки	<ul style="list-style-type: none"> <li>– встановити резервуар для зберігання стічної води перед зливовою каналізацією;</li> <li>– реконструювати злизову каналізацію та збільшити її розміри</li> </ul>
Згідно з архівними даними місцевість біля села періодично затоплювалась внаслідок зливових опадів. Зі збільшенням кількості мешканців населений пункт розширився і тепер ці території забудовані. Цього року внаслідок злив затопило 15 будинків і підприємств, розташованих на вказаній території. Місцевість дуже рівна і погано дренована. Будівництво будинків і вулиць у формі сітки перерізло дренажні шляхи, які існували до забудови	<ul style="list-style-type: none"> <li>– покращити дренаж;</li> <li>– викупити власність, що розташовується нижче забудованої території та перепланувати цю ділянку як водосховище</li> </ul>

*Джерело: розробка авторів*

Етап «Перегляд альтернативних підходів захисту від затоплення на рівні району». Мета аналізу території полягає в тому, щоб визначити, чи є методи на рівні

громади реальними і ефективними. Наведемо декілька прикладів таких методів:

– модифікації дренажу, такі як усунення перешкод або розширення водопропускних труб, каналів або зливової каналізації, щоб відводити паводкові води від території;

– накопичувачі для утримування води вище за течією від території та/або випускання її з часом;

– дамби, греблі, віадуки та інші споруди для відведення паводкових вод від затоплених об'єктів;

– кращий догляд за дренажною системою для усунення перешкод підземним потокам;

– придбання ділянок, що регулярно затоплюються та нерухомості на ній і зміна функціонального призначення цієї території для інших відповідних цілей.

Деякі підходи будуть очевидними, а для вивчення інших знадобиться деякий час. Якщо населення громади погодилося щодо одного чи двох методів, їх слід дослідити в комплексі, навіть якщо професійні інженери вважають, що вони будуть малоефективні. Успіх реалізації цих проєктів залежить від підтримки громади, тому слід реально враховувати інтереси мешканців і чітко пояснювати переваги та недоліки кожного проєкту.

Приклади методів, які можна вивчити для різних сценаріїв проблем, наведено в табл. 1. Незважаючи на те, що ці рішення можуть здатися простими, інженеру потрібно переглянути їхні переваги та недоліки та визначити ефективність цих методів і фінансову складову їхньої реалізації. Наприклад, встановлення більшої зливової каналізації є відповіддю на перевантажену зливову каналізацію. Однак заміна наявних каналізаційних колекторів може бути дуже дорогою і слід враховувати вплив збільшення потоків на об'єкти, розташовані нижче за течією. Досвідчений інженер одразу унеможливить такий підхід як нерентабельний. З огляду на це фінансовий аналітик має надати приблизну оцінку витрат на реалізацію зазначеного проєкту як підтвердження недоцільності виконання цього заходу.

Етап «Координація роботи з іншими службами щодо діяльності на обраній території». Інші установи чи організації можуть мати плани, які можуть вплинути

на причину або наслідки повені. Наприклад, якщо придорожня канава розташована вздовж автомобільної дороги обласного чи державного значення, а в органах місцевої влади є плани на її ремонт, виконання аналізу та будь-яких досліджень буде важко реалізувати. Або з іншого боку, в кошторис ремонту можна включити і роботи з реконструкції цієї канави.

Основні установи та організації, до яких слід звертатися:

– відповідальна організація за проблеми з повеннями, дренажем або каналізацією;

– обласний чи державний департамент інфраструктури, який може відновити канаву чи водопропускну трубу або працювати над проєктом, який вплине на здійснення дренажу;

– управління молоді та спорту, які можуть бути зацікавлені у розширенні відкритих відпочинкових просторів або спортивних майданчиків;

– землевласники, забудовники чи агентство економічного розвитку, які можуть бути зацікавлені в придбанні, розчищенні та реконструкції деяких об'єктів нерухомості;

– управління з питань надзвичайних ситуацій, яке володіє інформацією про поточні заходи щодо пом'якшення наслідків, джерела фінансування та їхні пріоритети;

– екологічні або волонтерські організації, які можуть бути зацікавлені в перетворенні проблемних зон на відкритий відпочинковий простір.

Аналітик має обговорити результати третього етапу із вказаними вище інституціями, щоб визначити, чи є можливість для співпраці, координації, розподілу витрат або зміни методів для отримання підтримки від цих установ.

Етап «Документування результатів аналізу». Відповідальна особа, що проводить аналіз має підготувати короткий звіт, який містить такі пункти:

– короткий опис процесу, який був виконаний;

– підбиття загальних висновків за результатами анкетування мешканців;

– розроблення таблиці або карти території можливого затоплення та/або водозбірною басейну, якщо можливо;

– переглянуті альтернативні рішення, їхні переваги та недоліки;

– заходи, що плануються виконувати на досліджуваній території іншими установами та організаціями;

– висновки та рекомендації.

Задokumentований результат аналізу подається на розгляд керівництву об'єднаної територіальної громади для погодження. На цьому кроці розпочинається процес погодження. Перш ніж офіційно затвердити запропонований документ, необхідно зробити такі заходи.

1. Інформування мешканців ОТГ. Підтримка мешканців дуже важлива, зокрема якщо запропонований проект залежить від доступу до приватної власності або добровільного продажу нерухомості. Результати аналізу необхідно довести до мешканців та власників нерухомості території затоплення. Це можна зробити електронною поштою або надіслати сповіщення всім із вебпосиланням на інтернетний ресурс, де можна прочитати документ. Також необхідно організувати зустріч із мешканцями громади, на якому населення зможе поставити запитання та висловити свою підтримку щодо запропонованих методів захисту територій від затоплення.

2. Розробити детальні кроки реалізації проекту. Якщо рекомендований проект виявиться доцільним (тобто він зменшить втрати від повені та має підтримку мешканців), слід перевірити, що він може бути реалізованим (тобто він економічно ефективний і може бути профінансований). Відповідальна особа, що проводить аналіз, має оцінити співвідношення вартість-ефективність під час виконання заходів захисту від затоплення.

Для невеликих проектів, таких як очищення каналу, додаткові деталі можуть не знадобитися. Для великих проектів необхідно буде підготувати офіційну оцінку його вартості.

3. Визначення джерел фінансування. Останнім заходом перед затвердженням є складання графіка та фінансування

рекомендованого проекту. Невеликі проекти, наприклад очищення каналу, можуть бути у вигляді замовлення для відділу інфраструктури або виконані силами громади. Більші проекти доведеться фінансувати самостійно або складати в бюджет окремо.

Зазвичай залучають такі чотири джерела фінансування для проектів захисту територій від затоплення:

– місцеві кошти;

– обласні кошти;

– державні кошти;

– добровільні пожертви власників підприємств.

Зазвичай більші проекти використовують комбінацію джерел. Наприклад, більшість державних і обласних програм фінансуватимуть лише певний відсоток від вартості проекту та потребуватимуть внеску з бюджету громади або залучення спонсорських коштів.

**Висновки та напрями подальших досліджень.** З огляду на останні дослідження та публікації щодо механізмів функціонування органів державної влади на усіх рівнях, методів та підходів до реалізації та впровадження проектів захисту населення від затоплення та практики застосування засад управління ризиками виникнення надзвичайних ситуацій (з урахуванням міжнародного досвіду) дійшли висновку, що на сьогодні розроблені моделі управління ризиками виникнення надзвичайних ситуацій лише на державному рівні. А як показав аналіз досліджень, найефективнішими і довготривалими вважаються заходи, проведені на рівні громад. Зважаючи на зазначене, автори розробили модель управління ризиками виникнення затоплення територій на рівні ОТГ, до якої надано рекомендації щодо виконання кожного етапу з можливими прикладами їх реалізації. Крім того, детально описано процес погодження проекту з керівництвом громади та мешканцями, що був вибраний внаслідок аналізу, а також підготовку його до затвердження з розробленими кроками реалізації та можливими джерелами фінансування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Офіційний сайт National Intelligence Council – Global Trends. Available at : [www.dni.gov/nic/globaltrends](http://www.dni.gov/nic/globaltrends).
2. Стародуб Ю. П., Гавриць А. П., Ковальчук В. М., Рогуля А. О., Філіппова В. Досягнення стабільного розвитку територій шляхом реалізації проекту визначення зон паводкового затоплення в Україні. *Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України «Надзвичайні ситуації : попередження та ліквідація»*. Черкаси. 2022. 6(1). С.103–114.
3. Федорчак В. В. (2018). Механізми державного управління ризиками виникнення надзвичайних ситуацій в Україні. *Національний університет цивільного захисту України*. Харків, 429 с.
4. Федорчак В. В. (2018). Аналіз й оцінка особливостей функціонування організаційного механізму державного управління ризиками виникнення надзвичайних ситуацій в Україні. *Інвестиції : практика та досвід*, (6), С. 49–51.
5. Іванова Т. В. (2020) Механізми державного управління ризиками надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру. *Вчені записки*, 2202086. С. 86–89.
6. Гусаріна Н. В., Гусаріна Н. В., Черкасова, С. О., & Черкасова, С. А. (2021). Ризик менеджмент надзвичайних ситуацій. *Економічний журнал Одеського політехнічного університету*, (3 (17)). С. 63–68.
7. Занора В. О., Зачосов Н. В. (2020). Управління ризиками проектів розвитку підприємства: теоретико-методичні засади. *Прийзовський економічний вісник*, 1(18), С. 82–86.
8. Івануса А. І., Яковчук, Р. С., Ємельяненко, С. О., & Івануса, З. З. (2019). Управлінські та інформаційні особливості проекту безпечної експлуатації спортивно-видовищних споруд. *Науковий Вісник НЛТУ України*, (29, (8)). С. 134–141.
9. Данкевич В. Ї., Прокопчук, О., & Усюк, Т. В. (2020). Партиципативне управління локальною безпекою територіальних громад : досвід і практика ЄС. *Problemy Ekonomiky*, (4), 35–41.
10. Andrew Maskrey (2011) Revisiting community-based disaster risk management, *Environmental Hazards*, 10:1, 42-52, DOI: 10.3763/ehaz.2011.0005.
11. Harry Smith, Soledad Garcia Ferrari, Gabriela M. Medero, Helena Rivera, Françoise Coupé, Mónica Elizabeth Mejía Escalante, Wilmar Castro Mera, Carlos Alberto Montoya Correa, Alex Abiko, Fernando A. M. Marinho. (2022) Exploring appropriate socio-technical arrangements for the co-production of landslide risk management strategies in informal neighbourhoods in Colombia and Brazil. *International Journal of Urban Sustainable Development* 14:1, pages 242–263.
12. Robert Šakić Trogrlić, Grant B. Wright, Adebayo J. Adeloye, Melanie J. Duncan, Faïdess Mwale. (2018) Taking stock of community-based flood risk management in Malawi : different stakeholders, different perspectives. *Environmental Hazards* 17:2, p. 107–127.
13. Thanh Mai, Shahbaz Mushtaq, Kate Reardon-Smith, Paul Webb, Roger Stone, Jarrod Kath, Duc-Anh An-Vo, Defining flood risk management strategies : A systems approach. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Volume 47, 2020, 101550, ISSN 2212-4209, <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101550>.
14. Starodub, Y., Karabyn, V., Havrys, A., Kovalchuk, V., Rogulia, A., & Yemelyanenko, S. . (2022). Geophysical research in the pre-Carpathian hydrosphere situation for the environmental civil protection purposes. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 44(4), 171–182. <https://doi.org/10.24028/gj.v44i4.264847>
15. Starodub, Y. P. & Havrys, A. P., (2018). Conceptual model of portfolio management project for territories protection against flooding. *MATEC Web of Conferences* 247, 00019 (2018) <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824700019>
16. Рогуля А. О. (2018). Реалізація державної політики у сфері безпеки життєдіяльності на рівні територіальних громад. *Державне управління та місцеве самоврядування*, (3), 157–163.
17. Рогуля А. (2021). Аналіз ефективності діяльності органів місцевого самоврядування з організації безпеки життєдіяльності територіальних громад на основі економетричного моделювання. *Науковий вісник : Державне управління*, (1 (7)), 242–267.
18. Стародуб Ю. П., Гавриць А. П., & Федюк Я. І. (2014). Структура та методологія управління ризиками надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру. *Управління проектами і розвиток виробництва*, (1 (49)). С. 25–32.
19. Настанова щодо інженерного захисту територій, будівель і споруд від підтоплення та затоплення : ДСТУ-Н Б В.1.1-38:2016. Київ : УкрНДНЦ, 2016. 163 с.

REFERENCES

1. National Intelligence Council – Global Trends. Available at: [www.dni.gov/nic/globaltrends](http://www.dni.gov/nic/globaltrends).
2. Starodub Y. P., Havrys A. P., Kovalchuk V. M., Rogulia A. O., Filippova V.V. Achieving sustainable development of territories by implementations the project of determination of flood zones in Ukraine. *Collection of scientific works of the Cherkasy Institute of Fire Safety named after the Heroes of Chernobyl of the National University of Civil Defense of Ukraine Emergency situations: prevention and elimination." Cherkasy*. 2022. 6 (1). P. 103–114 [in Ukrainian].
3. Fedorchak V.V. (2018). Mechanisms of state management of emergency risks in Ukraine. *National University of Civil Defense of Ukraine. Kharkiv*, 429p. [in Ukrainian].
4. Fedorchak, V. V. (2018). Analysis and evaluation of the peculiarities of the functioning of the organizational mechanism of state management of the risks of emergency situations in Ukraine. *Investments: practice and experience*, (6), pp. 49–51 [in Ukrainian].
5. Ivanova T. V. (2020) Mechanisms of state management of man-made and natural emergencies. *Scholarly notes*, 2202086. P. 86-89 [in Ukrainian].
6. Husarina, N. V., Husaryna, N. V., Cherkasova, S. O., & Cherkasova, S. A. (2021). Risk management of emergency situations. *Economic Journal of Odessa Polytechnic University*, (3(17)). pp. 63–68 [in Ukrainian].
7. Zanora, V. O., Zachosova, N. V. (2020). Risk management of enterprise development projects: theoretical and methodological principles. *Pryazovsky Economic Bulletin*, 1(18), pp. 82-86 [in Ukrainian].
8. Ivanusa, A. I., Yakovchuk, R. S., Yemelyanenko, S.O. & Ivanusa, Z. Z. (2019). Management and information features of the project of safe operation of sports and entertainment facilities. *Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine*, (29, (8)). P. 134–141.
9. Dankevych, V. E., Prokopchuk, O., & Usiuk, T. V. (2020). Participatory management of local security of territorial communities: EU experience and practice. *Problemy Ekonomiky*, (4), 35–41 [in Ukrainian].
10. Andrew Maskrey (2011) Revisiting community-based disaster risk management, *Environmental Hazards*, 10:1, 42–52, DOI : 10.3763/ehaz.2011.0005 [in English].



11. Harry Smith, Soledad Garcia Ferrari, Gabriela M. Medero, Helena Rivera, Françoise Coupé, Mónica Elizabeth Mejía Escalante, Wilmar Castro Mera, Carlos Alberto Montoya Correa, Alex Abiko, Fernando A. M. Marinho. (2022) Exploring appropriate socio-technical arrangements for the co-production of landslide risk management strategies in informal neighbourhoods in Colombia and Brazil. *International Journal of Urban Sustainable Development* 14:1, P. 242–263 [in English].
12. Robert Šakić Trogrić, Grant B. Wright, Adebayo J. Adelaye, Melanie J. Duncan, Faïdess Mwale. (2018) Taking stock of community-based flood risk management in Malawi: different stakeholders, different perspectives. *Environmental Hazards* 17:2, P. 107–127 [in English].
13. Thanh Mai, Shahbaz Mushtaq, Kate Reardon-Smith, Paul Webb, Roger Stone, Jarrod Kath, Duc-Anh An-Vo, Defining flood risk management strategies: A systems approach, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Volume 47, 2020, 101550, ISSN 2212-4209, <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101550> [in English].
14. Starodub, Y., Karabyn, V., Havrys, A., Kovalchuk, V., Rogulia, A., & Yemelyanenko, S. . (2022). Geophysical research in the pre-Carpathian hydrosphere situation for the environmental civil protection purposes. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 44(4), 171–182. <https://doi.org/10.24028/gj.v44i4.264847> [in English].
15. Starodub, Y. P. & Havrys, A. P., (2018). Conceptual model of portfolio management project for territories protection against flooding. *MATEC Web of Conferences* 247, 00019 (2018) <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824700019> [in English].
16. Rogulia, A. O. (2018). Implementation of state policy in the field of life safety at the level of territorial communities. *State administration and local self-government*, (3), P. 157–163. [in Ukrainian].
17. Rogulia, A. (2021). Analysis of the effectiveness of the activities of local self-government bodies in the organization of life safety of territorial communities based on econometric modeling. *Scientific Bulletin: State Administration*, (1 (7)), P. 242–267. [in Ukrainian].
18. Starodub, Y.P., Havrys, A.P., & Fediuk, Y. I. (2014). The structure and methodology of natural and man-made emergency risk management. *Project management and production development*, (1 (49)). P. 25–32 [in Ukrainian].
19. Instruction on engineering protection of territories, buildings and structures against flooding and flooding : DSTU-N B V.1.1-38:2016. Kyiv : UkrNDNC, 2016. 163p. [in Ukrainian].

## RISK MANAGEMENT OF EMERGENCY SITUATIONS RELATED TO THE FLOODING OF TERRITORIES AT THE LEVEL OF UNITED TERRITORIAL COMMUNITIES

A. Havrys, R. Yakovchuk, Y. Starodub, N. Tur

*Lviv State University of Life Safety, Ukraine*

---

### KEYWORDS: ANNOTATION

civil protection, project management, emergency situations, management model, protection measures.

In the article analyzes the latest research and publications on the functioning of the organizational mechanism of state emergency risk management, aspects of risk management at the object level of enterprises, institutions and organizations, foreign experience of past and current initiatives at the community or local level regarding emergency risk management, the strategy of joint management of the risks of landslides and floods for settlements in leading countries and «Third World countries», models and mechanisms for the implementation of projects to protect territories from flooding and modern aspects of the state implementation policy in the sphere of life safety of territorial communities, where the state, in the process of local decentralization self-government bodies, delegates their powers to ensure life safety. Concluded that to date, emergency risk management models have been developed only at the state level, and at other levels, including the level of united territorial communities, the mentioned mechanisms have not been developed. The authors developed a model for managing the risks of flooding territories at the level of a united territorial community, which includes the process of territory analysis, which is divided into eight stages and the approval process, which consists of three steps. For each stage and step of the processes, recommendations for implementation with possible examples of their implementation are provided. Additionally, an example table of the results of the second stage of territory analysis is given, which clearly demonstrates the expected result of its implementation. In addition, the process of agreeing the project, which was selected as a result of the analysis, with the community leadership and residents, as well as preparing it for approval, is described in detail. This process consists of: informing community residents about the results of the analysis, developing detailed steps for project implementation, and determining possible sources of funding.

УДК 614.841.45

## АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ ПРОГИНУ ЗРАЗКІВ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ СХОДОВИХ МАРШІВ ПІД ЧАС ВОГНЕВИХ ВИПРОБУВАНЬ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1.110-116>

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:

вогневе випробування,  
залізобетон, сходовий марш,  
прогин, тріщина, термопара,  
втрата несучої здатності.

### АНОТАЦІЯ

У роботі розглянуто результати, отримані під час проведення випробувань на вогнестійкість залізобетонного сходового маршу, а саме – вивчено механічні процеси, що відбуваються у внутрішніх шарах матеріалу, а також проаналізовано швидкість наростання і максимальне значення прогину зразків. Під час вогневих випробувань появи граничного стану за фіксацією втрати несучої здатності зразків залізобетонних сходових маршів не спостерігалось. Контроль утворення тріщин за обраною методикою засвідчив відсутність прояву таких, які б загрожували руйнуванням зразкам залізобетонних сходових маршів. Загалом за результатами проведених вогневих випробувань досліджувані зразки відповідають класу вогнестійкості R 60. Було зазначено максимальні значення прогину та швидкості наростання деформації. Додатково проаналізовано результати дослідження тріщин та дроблень бетону зразків залізобетонних сходових маршів під час вогневих випробувань. Отримані дані дають змогу зробити висновок, що механічні процеси, які відбуваються у внутрішніх шарах, відповідають теоретичним уявленням.

**Постановка проблеми.** Відповідно до статистичних даних про пожежі та надзвичайні ситуації, які є наслідками пожеж, одним із найбільш важливих факторів, що встановлює рівень пожежної небезпеки будівельних об'єктів, є вогнестійкість будівельних конструкцій, зокрема залізобетонних сходових маршів. Важливість вогнестійкості залізобетонних сходових маршів підкреслюють тим, що вони є частиною шляхів безпечної евакуації. Відомо, що забезпечення вогнестійкості всіх будівельних конструкцій і залізобетонних маршів у тому числі, є точна її оцінка. Для цього є можливість застосування як експериментальних, так і розрахункових методів відповідно до сучасних європейських будівельних норм, імплементованих в Україні [1–2], та нормативних документів, що є

чинними у державі [3–4].

Усі будівельні конструкції, зокрема сходи, мають межу вогнестійкості, що характеризується часом стійкості під дією високої температури. Для залізобетонних маршів велике значення має межа вогнестійкості за несучою здатністю як основний показник можливості їхньої експлуатації в умовах пожежі. Враховуючи важливість забезпечення необхідної вогнестійкості залізобетонних сходових маршів як шляхів евакуації, удосконалення методів оцінки вогнестійкості для них створить передумови для підвищення пожежної безпеки об'єктів будівництва як елемент загальної проблеми забезпечення необхідного часу евакуації людей під час пожежі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Методи розрахункової

оцінки вогнестійкості залізобетонних сходових маршів наведені в роботах [5–6]. Ці методи отримали широке поширення та суттєвий розвиток. Прогрес обчислювальних алгоритмів дає змогу враховувати всі значущі процеси, особливості будови залізобетонних сходових маршів та динаміку їхнього нагрівання під час пожежі. Але в зазначених роботах не приділено достатньої уваги експериментальним випробуванням за стандартним температурним режимом пожежі.

Зокрема, у роботі [6] наведено основні розрахункові методики, що використовують інженерний підхід, заснований на спрощених математичних моделях опору матеріалів, який є основою для спрощених методів. Також слід зауважити, що такі методи для залізобетонних сходових маршів на сьогодні розвинуті недостатньо. Разом обидва типи методів для розрахункової оцінки вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій становлять систему, що визначає всі типи конструкцій. Залізобетонні сходові марші не виділено в окремий вид. Робота [7] відображає основні аспекти під час реалізації зазначеного підходу. Проте для залізобетонних сходових маршів уточнений підхід до розрахунку вивчено недостатньо. Водночас у роботі [7] стверджується, що перспективною альтернативою для цього є математичне моделювання із використанням методу кінцевих елементів (польові моделі), що своєю чергою є основою для уточнених розрахункових методів [1–3], які входять також як компонент у ієрархічну систему, описану в настанові [2]. З огляду на зазначене ця робота у перспективі спрямована на розвиток методів розрахункової оцінки вогнестійкості залізобетонних сходових маршів, удосконалення яких базуватиметься на даних, отриманих під час експериментальних досліджень та аналізу результатів, і є актуальною науковою задачею.

У роботі [8] отримано результати

експериментальних досліджень температурних характеристик напруженого деформованого стану залізобетонного сходового маршу в умовах вогневих випробувань за стандартним температурним режимом пожежі. З метою здійснення експериментального дослідження розроблено методику вогневих випробувань і здійснено дослідження на основі вогневих випробувань. Внаслідок цього проведено експериментальне дослідження, визначено основні характеристики розподілу температури в перерізі та внутрішньому шарі залізобетонного сходового маршу, а також визначено залежність максимального прогину від часу. Отримані експериментальні результати були порівнянні із розрахунковими результатами. Проте не було виконано аналіз результатів вимірювань прогину зразків залізобетонних сходових маршів під час вогневих випробувань, що й стало метою цього дослідження.

**Формулювання цілей дослідження.** Мета роботи полягає у дослідженні механічних процесів, які відбуваються у внутрішніх шарах залізобетонних сходових маршів, за результатами випробувань на вогнестійкість, а також аналізі швидкості наростання і максимального значення прогину зразків.

Для досягнення цієї мети поставлено такі завдання:

- проаналізувати наростання прогину зразків залізобетонних сходових маршів та швидкості наростання величини максимального прогину під час випробувань на вогнестійкість сходового маршу;

- оцінити дефекти бетону, що виникли у бетоні зразків залізобетонних сходових маршів після вогневих випробувань;

- окреслити перспективи досліджень надалі.

**Методи дослідження.** Експериментальні дослідження зразків проведено на установці, що являє собою вогневу піч із паливно-форсуновою

системою із використанням дизельного палива з автоматичним управлінням. До зразків прикладено механічне навантаження за допомогою бетонних фундаментних блоків. У роботі [8] проведено дослідження теплового впливу на залізобетонні сходові марші в умовах вогневих випробувань відповідно до стандартної методики [3–4]. Результати [8] були вхідними даними для цієї роботи. Випробування проведено протягом контрольного проміжку часу, який відповідає найбільшому часовому проміжку настання граничного стану для залізобетонних сходових маршів згідно з ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги [3]. Висновок про момент настання граничного стану втрати несучої здатності залізобетонних сходових маршів здійснюється на основі критеріїв, які встановлені у стандартах щодо випробувань на вогнестійкість ДСТУ Б В.1.1-4-98\* [4] та ДСТУ Б В.1.1-23:2009 [2]. Для досліджуваних залізобетонних сходових маршів розроблено схему закладання термопар у перерізі зразків.

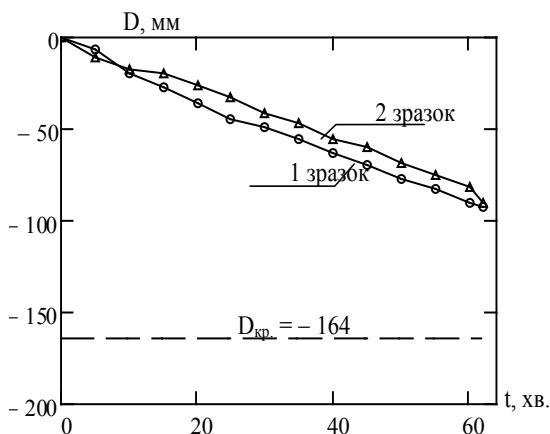


Рисунок 1 – Наростання прогину зразків залізобетонних сходових маршів під час випробувань на вогнестійкість сходового маршу

На рис. 2 наведені криві швидкості наростання величини максимального прогину зразків залізобетонних сходових

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Використовуючи дані вогневих випробувань зразків залізобетонних сходових маршів [7–8], були визначені максимальний прогин під час нагрівання за стандартним температурним режимом пожежі. На рис. 1 наведені криві залежностей найбільшого прогину у вертикальному напрямку зразків залізобетонних сходових маршів від часу вогневого впливу. Криві, наведені на рис. 1, також показані разом із горизонтальною лінією, рівень якої відповідає критичному значенню прогину. Граничним станом за ознакою втрати несучої здатності (ознака R) є стан, за якого виконується одна з таких умов:

- значення прогину ( $D$ ) конструкції перевищує значення

$$D=L^2/400b \text{ мм}; \quad (1),$$

- швидкість наростання деформації ( $dD/dt$ ) перевищує значення

$$dD/dt=L^2/9000b \text{ мм/хв.}, \quad (2),$$

де:  $L$  – прогин, мм;  $b$  – розрахункова висота перерізу конструкції, мм.

Якщо значення прогину не більше  $L/30$ , то граничною деформацією є тільки граничне значення прогину ( $D$ ).

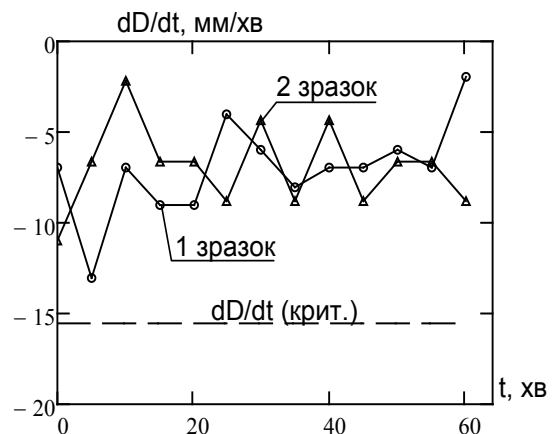


Рисунок 2 – Швидкість наростання величини максимального прогину зразків залізобетонних сходових маршів за результатами випробувань на вогнестійкість

маршів за результатами випробувань на вогнестійкість.

Під час проведення аналізу результатів експериментів, наведених на

рис. 1 та 2, зазначено: у процесі вогневих випробувань появи граничного стану за фіксацією втрати несучої здатності зразків залізобетонних сходових маршів, що регламентовано у будівельних стандартах, чинних в Україні [1–4], щодо проведення вогневих випробувань залізобетонних сходових маршів, не спостерігалось. Також здійснено замір тріщин, що утворилися після завершення завогневого впливу на сходовий марш, відповідно до методики, описаної у [8]. Результати засвідчили відсутність появи тріщин, що здатні загрожувати руйнуванням зразкам залізобетонних сходових маршів.

Загалом результати проведених вогневих випробувань залізобетонних сходових маршів дають змогу зробити висновок, що досліджувані зразки відповідають класу вогнестійкості R 60.

На рис. 3 паведені побудовані криві середніх величин найбільшого прогину зразків залізобетонних сходових маршів

разом із отриманими відхиленнями під час вогневих випробувань.

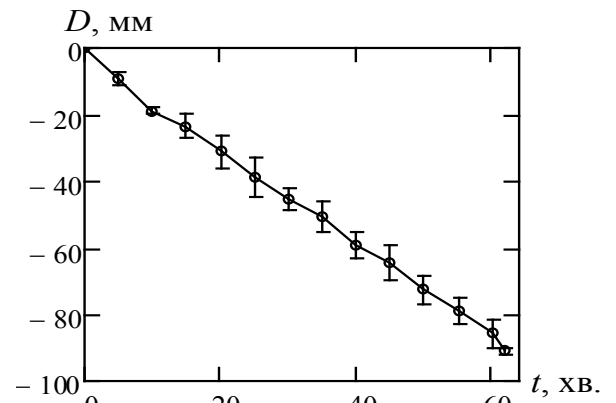


Рисунок 3 – Залежність середніх величин найбільшого прогину зразків залізобетонних сходових маршів разом із отриманими відхиленнями під час вогневих випробувань

На фотоматеріалах вогневих випробувань було зафіксовано тріщиноутворення та дроблення бетону зразків залізобетонних сходових маршів.

На рис. 4 наведені фотознімки ушкоджень після вогневих випробувань.



Рисунок 4 – Зовнішній вигляд дефектів бетону, що виникли у бетоні зразків залізобетонних сходових маршів після вогневих випробувань

У бетоні досліджуваних зразків залізобетонних сходових маршів унаслідок вогневих випробувань спостерігалась поява тріщин. Водночас загальний вигляд їх розподілу наведено на рис. 5.

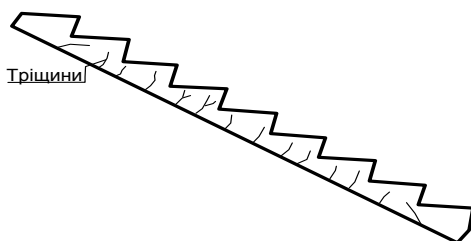


Рисунок 5 – Розташування тріщин у бетонній основі сталезалізобетонної плити сходового маршу

Для аналізу характеру розвинення тріщин у бетоні залізобетонних сходових маршів була оцінена середня висота тріщин на зовнішній поверхні у зразках у процесі випробувань. Розмір тріщин під зразками та на них під час та по завершенню випробувань вимірювався за допомогою спеціальних метрологічних засобів, що відповідали вимогам [9]. На рис. 6 наведені криві зміни середньої висоти тріщин від часу вогневого впливу.

Незначні тріщини існували на поверхні зразка до початку вогневого впливу ( $t = 0$  хв.), висота тріщин  $h_c$  вже складала не більше 30 мм, що є дефектами,

які виникають під час виготовлення, сушіння та транспортування залізобетонних виробів. За результатами вогневого впливу ( $t = 60$  хв.) висота тріщин  $h_c$  складає 90 мм. Заміри проводились лише на зовнішній боковій поверхні сходового маршу під час експериментальних досліджень.

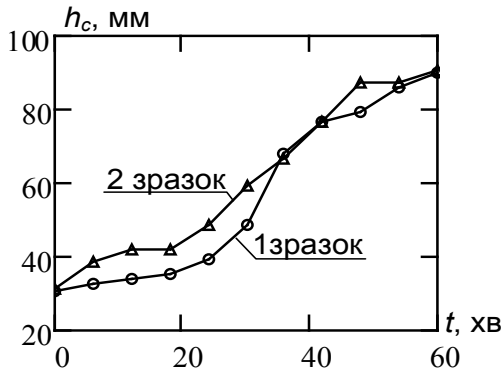


Рисунок 6 – Криві залежностей від часу вогневого впливу середньої висоти тріщин на зовнішній поверхні у різних зразках залізобетонних сходових маршів

Отримані дані під час вогневих випробувань зразків залізобетонних сходових маршів дають змогу зробити висновок, що механічні процеси, які відбуваються у внутрішніх шарах, відповідають теоретичним уявленням та результатам експериментальних досліджень, що відомі з робіт [5–8]. Під тепловим впливом в умовах випробувань досліджувані зразки залізобетонних сходових маршів мали деформацію згину і максимальний прогин зразків постійно зростає донизу, тобто у бік, звідки здійснювався температурний вплив у вогневій печі. На температурних кривих нагріву внутрішніх шарів зразків залізобетонних сходових маршів існує горизонтальна ділянка із показниками температури близько 100 °С, що може бути пояснено випаровуванням наявної вологи у порах бетону.

## Висновки та напрями подальших досліджень.

За результатами, отриманими під час проведення дослідження, вивчено механічні процеси, що відбуваються у внутрішніх шарах залізобетонних сходових маршів за результатами випробувань на вогнестійкість, а також проаналізовано наростання і максимальне значення прогину зразків. Зазначене дало змогу підсумувати результати, що викладено нижче:

1. У процесі вогневих випробувань поява граничного стану за фіксацією втрати несучої здатності зразків залізобетонних сходових маршів, що регламентована у будівельних стандартах, чинних в Україні [1–4] щодо проведення вогневих випробувань залізобетонних сходових маршів, не спостерігалася. Аналіз утворення тріщин за обраною методикою показав відсутність їхнього виникнення, тому загрози руйнування зразків залізобетонних сходових маршів з цієї причини не було. Загалом унаслідок проведених вогневих випробувань досліджувані зразки відповідають класу вогнестійкості R 60.

2. Під час проведення випробувань проаналізовано максимальні значення прогину та швидкості наростання деформації, що склали 92 мм та 2,6 мм/хв відповідно.

3. Результати, отримані в цій роботі, дають можливість розробити та створити комп'ютерні моделі поведінки залізобетонних сходових маршів в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі та перевірити адекватність виконаних розрахунків. На основі цього можна встановити закономірності та побудувати математичну модель зміни межі вогнестійкості залізобетонних сходових маршів з огляду на їхні конструктивні параметри.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ Б В.1.1-23:2009 (EN1363-6:2004, MOD). Захист від пожежі. Сходи. Метод випробування на вогнестійкість. Київ : Мірегіонбуд України, 2010. 33 с.
2. EN 1992-1-2:2005 Eurocode 2 : Design of concrete structures Part 1–2 : General rules – Structural fire design, Brussels, 2004.

3. ДБН В 1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. [Чинний від 2017-06-01]. Київ : Мінрегіон України, 2017. 35 с.
4. 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.
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. Improvement of the Assessment Method for Fire Resistance of Steel Structures in the Temperature Regime of Fire under Realistic Conditions.// Materials Science Forum / Taras Shnal, Serhii Pozdieiev, Oleksandr Nuianzin, Stanislav Sidnei / 2020. Vol. 1006. P. 107–116.
7. Несен І. Дослідження поведінки залізобетонного сходового маршу в умовах теплового впливу пожежі. *Науковий вісник : Цивільний захист та пожежна безпека*. 2022. № 2(14). С. 143–152.
8. Дослідження теплового впливу на залізобетонні сходові марші в умовах вогневих випробувань / І. Несен, О. Некора, С. Поздєєв, А. Бондар / Надзвичайні ситуації : попередження та ліквідація, 2022. Т. 6. № 2. С. 73–82.
9. Метрологія. Державні випробування засобів вимірювальної техніки. Основні положення, організація, порядок проведення і розгляду результатів. ДСТУ 3400:2006 [чинний від 01.04.2007]. Вид. офіц. Київ: Укрметртестстандарт.

## REFERENCES

1. DSTU B V.1.1-23:2009 (EN1363-6:2004, MOD). Fire protection. Stairs. Fire resistance test method. – K.: Miregionbud of Ukraine, 2010. – 33 p. [in Ukrainian].
2. DSTU-N B EN 1992-1-2:2005 Eurocode 2.: Design of concrete structures Part 1-2: General rules – Structural fire design, Brussels, (EN 1992-1-2:2004, IDT) [in Ukrainian].
3. Pozhezhna bezpeka ob'ektiv budivnytstva. Zahalni vymohy [Fire safety of construction sites. general requirements]. (2017). DBN V 1.1-7:2016 from 1 June 2017. Kyiv: Minrehion Ukrainy [in Ukrainian].
4. Budivelni konstruktсии. Metody vyprobuvan na vohnestiikist. 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]
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. [in English].
6. Shnal, T., Pozdieiev, S., Nuianzin, O., (2020) Improvement of the Assessment Method for Fire Resistance of Steel Structures in the Temperature Regime of Fire under Realistic Conditions, Volume 1006 – pp. 107 – 116. Materials Science Forum [in English].
7. Nesen, I. (2022). Doslidzhennya povedinky zalizobetonnoho skhodovoho marshu v umovakh teplovoho vplyvu pozhezhi. [Study of the behavior of a reinforced concrete staircase under the conditions of the thermal effect of a fire]. *Naukovyy visnyk: Tsyvil'nyy zakhyst ta pozhehzna bezpeka*. № 2(14). P. 143–152. [in Ukrainian].
8. Nesen, I., Nekora, O., Pozdyeyev, S., Bondar, A. (2022). Doslidzhennya teplovoho vplyvu na zalizobetonni skhodovi marshi v umovakh vohnevnykh vyprobuvan [Study of thermal effects on reinforced concrete stairwells under conditions of fire tests] *Nadzvychnayni sytuatsiyi: poperedzhennya ta likvidatsiya*. P. 73-82. [in Ukrainian].
9. Metrolohiia. Derzhavni vyprobuvannia zasobiv vymiriuvalnoi tekhniki. Osnovni polozhennia, orhanizatsiia, poriadok provedennia i rozghliadu rezultativ. [Metrology. State tests of measuring equipment. Basic provisions, organization, procedure for conducting and reviewing results] (2006) DSTU 3400:2006. Kyiv : Ukrmetrteststandart. [in Ukrainian].

## FIRE TESTS RESULTS OF DEFLECTION MEASUREMENTS OF REINFORCED CONCRETE STAIRCASE SAMPLES ANALYSIS

I. Nesen

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

**KEYWORDS:** ANNOTATION

fire test,  
reinforced  
concrete,  
staircase,  
deflection, crack,  
thermocouple,  
loss of bearing  
capacity

In this work, the results obtained during the fire resistance tests of reinforced concrete staircases were analyzed, namely, the mechanical processes that take place in the inner layers of the material were studied, as well as the rate of growth and the maximum value of the deflection of the samples were analyzed. In the process of fire tests, the appearance of the limit state by fixing the loss of load-bearing capacity of samples of reinforced concrete staircases was not observed. Control of the formation of cracks according to the chosen method confirmed the absence of the appearance of cracks that would threaten the destruction of samples of reinforced concrete staircases. In general, according to the results of the fire tests, the studied samples correspond to the fire resistance class R 60. The maximum values of the deflection and the rate of growth of deformation were indicated. In addition, the results of the study of cracks and crushing of concrete of samples of reinforced concrete staircases during fire tests were analyzed. The obtained data allow us to conclude that the mechanical processes taking place in the inner layers correspond to theoretical ideas. Under the influence of heat in the test conditions, the examined samples of reinforced concrete staircases had bending deformation and the maximum deflection of the samples constantly increased downwards. On the temperature curves of the heating of the inner layers of samples of reinforced concrete staircases, there is a horizontal section with temperature indicators of about 100 °C, which can be explained by the evaporation of the moisture present in the pores of the concrete.

УДК 614.841.3

## МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА НИЖЧЕ ТЕМПЕРАТУРИ СПАЛАХУ В МАСЛОПРИЙМАЧІ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1.116-127>

Іллученко П.О.\*, ORCID iD 0000-0001-6687-6388

Ніжник В.В., ORCID iD 0000-0003-3370-9027

Нікулін О.Ф., ORCID iD 0000-0001-9126-0681

\*E-mail: illuchenko@ukr.net

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

### ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

*Надійшла до редакції: 31.04.2022*

*Пройшла рецензування:*

*15.05.2022*

### КЛЮЧОВІ СЛОВА:

трансформаторна підстанція, маслоприймач, гравійна засипка, теплообмінник.

### АНОТАЦІЯ

Наведено статистику виникнення пожеж із використанням маслонаповненого електроустаткування на підприємствах паливно-енергетичного комплексу, які сталися в Україні впродовж 2017–2021 років. Визначено основні причини виникнення пожеж на трансформаторних підстанціях. Проаналізовано підходи до обмеження поширення пожежі на маслонаповнених трансформаторних підстанціях щодо способів конструктивного улаштування маслосбірників із гравійною засипкою певних параметрів, які застосовуються в Україні та поза її межами. Визначено основний недолік застосування гравійної засипки як способу зниження аварійної температури трансформаторного масла до безпечних значень – проведення ресурсозатратного періодичного комплексу робіт з утримання її в чистоті. Здійснено аналіз останніх публікацій та досліджень стосовно підвищення пожежної безпеки трансформаторних підстанцій, оцінювання режимів горіння трансформаторного масла та проблематики гасіння горючих рідин. На основі аналітичних досліджень розроблено принципову схему експериментальної установки – теплообмінної системи (теплообмінника), яка має забезпечити зниження температури розігрітого масла від 250 °С до значення, що нижче температури спалаху 150 °С, під час проходження масла через теплообмінник протягом 900 с. Розроблено проект методики експериментальних досліджень та обґрунтування параметрів теплообмінної системи (теплообмінника) для зниження температури трансформаторного масла нижче температури спалаху у маслоприймачі трансформаторної підстанції з функцією відведення масла до маслосбірника. Методика дає змогу визначити зміни температури трансформаторного масла від 250 °С до значення, що нижче температури спалаху (150 °С), під час проходження масла через теплообмінник протягом 900 с.

**Постановка проблеми.** Відповідно до даних Міністерства енергетики України [1] за останніх п'ять років на підприємствах паливно-енергетичного комплексу сталося 100 пожеж, що завдало збитків у розмірі близько 158 млн грн.

Розподіл кількості пожеж, які сталися у паливно-енергетичному комплексі, залежно від напряму господарювання протягом 2017–2021 рр. наведено на рис. 1.

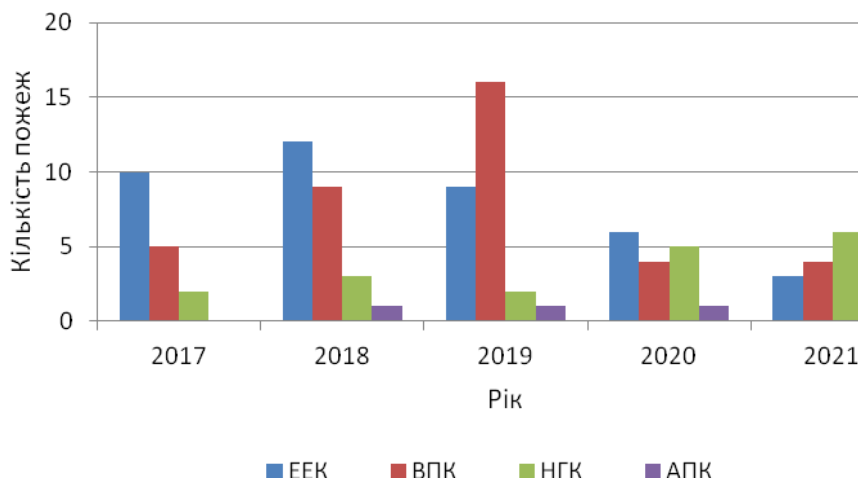
Як видно з діаграми, значна кількість пожеж сталася на підприємствах електроенергетичного комплексу (40 випадків). Близько 50% пожеж в цьому комплексі пов'язані з аварійними режимами роботи розподільних пристроїв та електричних підстанцій, зокрема з використанням маслонаповнених трансформаторів та масляних вимикачів. Також три пожежі такого типу були



зафіксовані у вугільно-промисловому та атомно-промисловому комплексах, остання з яких трапилася наприкінці листопада позаминулого року на території ВП «Південноукраїнська АЕС» ДП НАЕК «Енергоатом» унаслідок короткого замикання трансформатора струму вимикача В-132 фази ВРУ-330 кВ з його

розгерметизацією і подальшим загорянням трансформаторного масла та руйнуванням самого трансформатора [2].

Під час пожежі постраждалих не було, на роботу АЕС вона не вплинула. Прямих збитків від пожежі немає, а побічні склали 58,0 тис. грн.



ЕЕК – електроенергетичний комплекс; ВПК – вугільно-промисловий комплекс; НГК – нафтогазовий комплекс; АПК – атомно-промисловий комплекс

*Рисунок 1* – Розподіл кількості пожеж, які сталися у паливно-енергетичному комплексі, залежно від напряму господарювання протягом 2017–2021 рр.

*Джерело: розроблено авторами*

Відповідно до аналізу причин та обставин виникнення пожеж [1–2] основними причинами цього стали коротке замикання в електричних колах та електроустаткуванні (переважно трансформаторне обладнання) і порушення технологічних процесів через перевантаження електричної мережі. А досвід минулого року свідчить про значну кількість пожеж (на сьогодні – засекречену) трансформаторного обладнання внаслідок підступних ударів країни-агресора – росії по українському житловому фонду та об'єктах критичної інфраструктури.

Особливо масштабними можуть бути пожежі на маслонаповнених трансформаторах, адже кількість масла в деяких із них, зокрема розташованих на відкритому просторі, може сягати понад 50 тонн. Це масло призначене для ізоляції

частин і вузлів трансформаторів, що перебувають під напругою, відводу тепла, а також запобігання ізоляції від зволоження [3]. За ІЕС 60596-1-40 [4] трансформаторні мінеральні масла – це ізоляційні рідини класу О1. Це означає, що температура займання масла становить  $\leq 300$  °С, а нижча теплота згоряння  $\geq 42$  МДж/кг. Під час аварійного режиму роботи маслонаповненого електроустаткування може статися вилив розігрітого вище температури спалаху трансформаторного масла, яке може зайнятися та сприяти розвитку та поширенню пожежі. Вважається, що пожежі з викидом ізоляційних рідин класу О1 [4] завдають найбільших матеріальних збитків.

Загалом для обмеження поширення пожежі маслонаповненого електроустаткування застосовують

вогнестійкі перегородки, автоматичні системи пожежогасіння, унормовують відстані між елементами та спорудами енергетичних об'єктів тощо. Також важливу роль в напрямі забезпечення пожежної безпеки (та з урахуванням екологічної складової) відводять закордонній та вітчизняній практиці застосування маслоприймачів – ефективних пристроїв утилізації та знешкодження результатів дії розігрітого (палаючого) масла, що може витікати з обладнання, сприяючи поширенню пожежі та завдаючи шкоди навколишньому середовищу ПУЕ [3, 5], EN IEC 61936-1 [6], IEEE 979 [7], NFPA 850 [8], Guide for

Transformer Fire Safety Practices [9] тощо. З метою зменшення наслідків аварійної розгерметизації маслонаповнених трансформаторів як засобу для охолодження масла та обмеження до нього доступу повітря в маслоприймачах трансформаторів застосовують для визначених параметрів засипку з гірських порід (щебінь, гравій, галька тощо), що передбачає здійснення періодичного проведення ресурсозатратного комплексу заходів з утримання її в чистоті. В національному стандарті ДСТУ EN 61936-1 [10] наведені приклади поширених типів маслоприймачів (рис. 2).

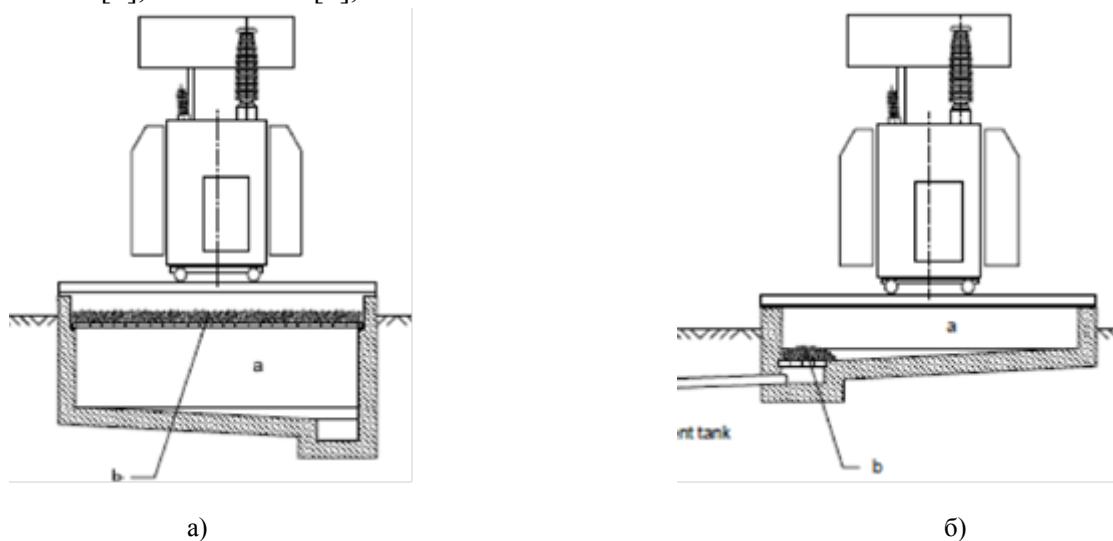


Рисунок 2 – Схематичні зображення конструктивного виконання маслоприймачів для трансформаторів: а) – маслоприймач без відведення масла, із засипкою на металевій решітці на всій площі маслоприймача; б) – маслоприймач із функцією відведення масла, із засипкою над приямком для збору масла

Джерело: [10]

В Україні відповідно до ПУЕ [3] та [11–12] як засипка для обох типів маслоприймачів (рис. 2) має застосовуватися шар товщиною не менше ніж 0,25 м із чистого гравію, промитого гранітного щебеню або непористого щебеню іншої породи із частками розміром від 30 мм до 70 мм.

Маслоприймачі без відведення масла в маслосбірник (рис. 2а) застосовують для трансформаторів (реакторів) потужністю до 10 МВА. Маслоприймачі з відведенням масла в маслосбірник (рис. 2б) мають застосовуватися для трансформаторів із масою масла понад 1 т в одиниці (в 1-му

баку). З огляду на те, що маса масла в таких трансформаторах може сягати більше 50 т, а також з урахуванням того, що дно таких маслоприймачів дозволено не покривати на всій площі засипкою, доцільно у цьому разі на системах відведення масла від трансформаторів передбачати установаження вогнезагороджувачів. Пожежі на таких трансформаторах можуть характеризуватися масштабністю та складністю гасіння. Окрім того, поширенню пожежі електропідстанцією може сприяти витік палаючого масла через несправний вогнезагороджувач у

загальний маслосбірник, до якого під'єднані маслоприймачі сусідніх трансформаторів.

Це зумовлює необхідність проведення досліджень, спрямованих на обґрунтування оптимальних параметрів ефективного засобу для зниження температури масла нижче температури спалаху – теплообмінної системи (далі – теплообмінника), що дає можливість замінити гравійну засипку у маслоприймачах із функцією відведення масла.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У розв'язанні актуальних питань щодо забезпечення пожежної безпеки, гасіння пожеж на об'єктах електроенергетики, обмеження поширення пожеж між будівлями, вивчення характеристик горіння трансформаторних масел брали участь вітчизняні та вчені інших країн: Д. Зозуля, В. Ніжник, Сан Руїбанг, Р. Климась та інші.

Так, у праці Д. Зозулі [13] запропоновано діагностичні методи контролю терміну служби трансформаторного обладнання за результатами дослідження аварійних режимів трансформаторів на об'єктах атомної енергетики України. В роботі П. Заїки [14] проаналізовано причини, що сприяють виникненню пожеж за участю маслонаповнених трансформаторів. У праці В. Ніжника [15] розглянуто проблематику оцінювання небезпеки поширення пожежі на суміжні об'єкти. Дослідження стосовно ефективності гасіння розливів трансформаторного масла за допомогою ручних та лафетних стволів проведено Ву Чуанпінг [16], а роботи таких вчених, як Лянг Лі [17], Сан Руїбанг [18–19] та Зао Джінлонг [20], присвячені вивченню характеристик горіння трансформаторних масел за умов вертикального проливу, струменевого витоку під тиском та за умов горизонтального розливу. Зокрема, уваги заслуговує робота Р. Климася [21], в якій обґрунтовано перелік найбільш значущих параметрів, що впливають на припинення горіння й охолодження трансформаторного

масла під час його проходження через гравійну засипку маслоприймачів трансформаторної підстанції.

Окрім цього, свого часу дослідження питань самозгасання полум'я рідких вуглеводнів проводили фахівці Українського науково-дослідного інституту пожежної безпеки МВС України [22], а в працях [23–24] наведені приклади розрахунків процесів газообміну під час горіння рідин, покритих дрібновічковими сітками, за допомогою яких досягається припинення горіння та зниження інтенсивності тепловиділення.

Однак у згаданих вище роботах не досліджено питання стосовно удосконалення системи попередження поширення пожежі щодо можливості реалізації ефективного (швидкодійного) засобу для зниження температури масла нижче температури спалаху, здатного замінити гравійну засипку в маслоприймачах трансформаторів.

**Формулювання цілей дослідження.** Метою статті є визначення основних положень методики експериментальних досліджень та обґрунтування параметрів теплообмінної системи для зниження температури трансформаторного масла нижче температури спалаху в маслоприймачі трансформаторної підстанції.

Кінцева мета дослідження полягає у виявленні закономірностей зміни температури трансформаторного масла від параметрів і характеристик теплообмінної системи, що має виконувати функції вогнезагороджувача й охолодження масла нижче температури спалаху. Для її досягнення необхідно розв'язати такі задачі:

- визначити тип і кількість необхідного обладнання та засобів вимірювальної техніки (ЗВТ);
- визначити конструкцію дослідного стенду;
- обґрунтувати порядок проведення експериментальних досліджень впливу параметрів теплообмінної системи на зміну температури трансформаторного масла.

**Методи дослідження.** У роботі для досягнення поставленої мети використано метод теоретичних досліджень, де було застосовано операції, такі як аналіз, синтез, аналогія, моделювання, узагальнення, систематизація тощо.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Сутність методу експериментальних досліджень полягає у виявленні закономірностей зниження

температури трансформаторного масла до значення, що нижче температури спалаху під час заповнення маслом теплообмінної системи, яка імітує вогнезагороджувач маслозбірника з відведенням масла. Проведення експериментальних досліджень має забезпечуватися засобами виміральної техніки, характеристики яких наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Характеристики засобів виміральної техніки

№ з/п	Найменування	Діапазон вимірювання	Клас точності, невизначеність / похибка засобу виміральної техніки	Призначеність ЗВТ
1	Термоанемометр цифровий AR 866	від 0,3 м/с до 50 м/с	$U = 1,44 \text{ м/с};$ $\Delta = \pm 0,2 \text{ м/с}$	Вимірювання швидкості вітру
2	Барометр-анероїд М67	від 610 мм рт. ст. до 790 мм рт. ст.	$U = 1,74 \text{ мм рт. ст.}$ $\Delta = \pm 1 \text{ мм рт. ст.}$	Вимірювання атмосферного тиску
3	Термогігрометр «Testo» 608-H1	від 0 °C до 50 °C; від 2 % до 98 %	$U = 0,4 \text{ °C}; \Delta = \pm 0,5 \text{ °C}$ $U = 1,5 \text{ %}; \Delta = \pm 3 \text{ %}$	Вимірювання температури та вологості навколишнього середовища
4	Секундомір СОС пр 2Б-2-010	від 0 с до 3600 с; від 0 с до 60 с; більше 60 с	2 клас точності; $U = 0,163 \text{ с};$ $\Delta = \pm (0,4 \cdot \tau_{\text{вим}} / 60) \text{ с};$ $\Delta = \pm (0,4 + 1,5 \cdot (\tau_{\text{вим}} - 60) / 3540) \text{ с}$	Вимірювання часу
5	ІВС «Термоконт»	від 0 до 1200 °C;	$U = 0,3 \text{ °C}; \Delta = \pm 0,35 \text{ °C}$	Реєстрація температури
6	Термопара ТХА	від 0 °C до 333 °C;	$U = 0,5 \text{ °C}$ $\Delta = \pm 2,5 \text{ °C}$	Вимірювання температури
		від 334 °C до 1200 °C	$U = 0,8 \text{ °C}$ $\Delta = \pm 0,0075 \pm T_{\text{вим}}$	
7	Фотоапарат CANON IXUS 185	20 Мп	-	Проведення фото- та відеозйомки

Експеримент має імітувати підвищення температури масла до аварійного значення (температура самозаймання) в трансформаторі, його розгерметизацію та вилив масла в маслоприймач, де воно має охолонути нижче температури спалаху під час проходження через тепловідвідні елементи. Трансформаторне масло марки Nymro 11GX [25], яке буде використане в дослідженнях, є горючою рідиною за [26], за характеристиками має відповідати стандарту ІЕС 60269 [27], де встановлено, що температура спалаху масла має бути не

менше ніж 135 °C. Температура самозаймання такого масла за джерелом [25] має бути більше ніж 270 °C. Але як діапазон зміни значень температури масла для експериментальних досліджень обрано уточнені результати роботи Р. Климася [28], де для масла марки Nymro 11GX експериментально визначено температуру спалаху (150 °C) та температуру самозаймання (250 °C).

Для реалізації поставленої мети спроектовано експериментальну установку, принципову схему якої наведено на рис. 3, що має забезпечити зниження температури

розігрітого масла від 250 °С до нижчого за температуру спалаху значення (150 °С).

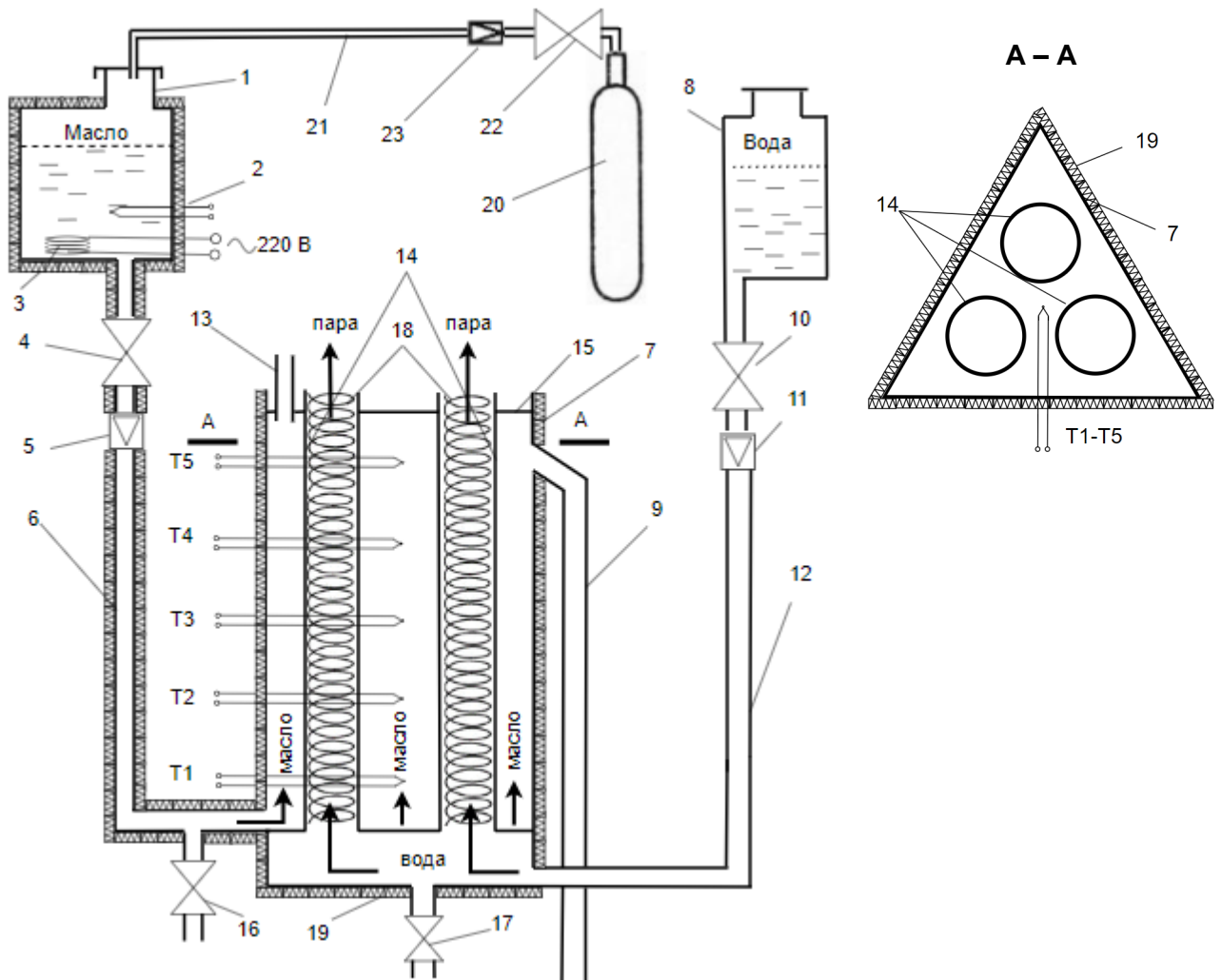


Рисунок 3 – Схема експериментальної установки

1 – резервуар для масла; 2 – термопара для вимірювання температури масла; 3 – трубчастий нагрівальний елемент (ТЕН) для нагрівання масла; 4 – засувка на магістралі для подавання масла; 5 – витратомір для масла; 6 – труба магістралі для подавання масла; 7 – корпус теплообмінника; 8 – резервуар для води; 9 – патрубок для виходу охолодженого масла з теплообмінника; 10 – засувка на магістралі для подавання води; 11 – витратомір для води; 12 – труба магістралі для подавання води до охолоджувального контуру теплообмінника; 13 – патрубок виходу повітря з простору заповнення масла; 14 – гофровані трубки з неіржавної сталі; 15 – кришка простору заповнення масла – верхня трубна решітка для гофрованих трубок із неіржавної сталі; 16 – засувка для повного зливу масла з масляного контуру теплообмінника; 17 – засувка для зливу води з теплообмінника; Т1, Т2, Т3, Т4, Т5 – термопари для вимірювання температури масла в масляному контурі теплообмінника; 18 – завихрювачі; 19 – теплоізоляційний матеріал; 20 – балон з вуглекислим газом; 21 – магістраль для подавання вуглекислого газу до резервуара з маслом; 22 – засувка; 23 – регулювальний редуктор

Джерело: розроблено авторами

Під час дослідження мають використовувати обладнання, що включає: експериментальну установку (рис. 3), засоби вимірювальної техніки, обладнання для проведення фото та відеозйомок (табл. 1).

Корпус, який імітує трансформатор (1) зображено на рис. 3. Він має бути виконаний із теплостійкого матеріалу, а його розміри мають забезпечувати вміщення масла масою не менше ніж 50 кг. Резервуар 1 виготовляють із листової сталі

товщиною до 2 мм за умови, що конструкція має витримувати вплив температури масла до 250 °С. У нижній частині всередині резервуара 1 розміщують трубчастий електричний нагрівач – ТЕН (3), що живиться від джерела струму для підігріву масла до температури 250 °С з метою імітації аварійної ситуації у трансформаторі, та термопару типу ТХА (2) для контролю температури масла в резервуарі (1). На дні резервуара (1) улаштовано магістраль подавання розігрітого масла до масляного контуру теплообмінника під дією сили тяжіння. Магістраль виконана за допомоги сталевих труби (6) діаметром 50 мм. Для здійснення контролю витрати масла у разі подавання до теплообмінника в магістраль вбудовано засувку (шаровий кран) (4) та витратомір (5), що забезпечують витрату масла масою близько 50 кг до теплообмінника за час не більше ніж 900 с, тобто 0,055 л/с. В нижній точці магістралі для подавання розігрітого масла розміщений зливний патрубок із засувкою (шаровим краном) (16) для виліву масла після проведення досліджень в зливну ємність. Для охолодження розігрітого масла в теплообміннику до температури 150 °С застосовують дистильовану воду, яка є в резервуарі (8), з об'ємом близько 20 л. Для подавання води під дією сили тяжіння до водяного контуру теплообмінника застосовують магістраль, що виготовлена за допомогою поліпропіленової труби (12) діаметром 25 мм. Для здійснення контролю витрати води під час подавання до теплообмінника в магістраль вбудовано засувку (шаровий кран) (10) та витратомір (11), що забезпечують необхідну витрату води за умов її випаровування в теплообміннику під час процесу теплообміну із розігрітим маслом.

Корпус теплообмінника (7) виготовлено з листової сталі товщиною до 2 мм. З'єднання елементів корпусу теплообмінника має бути герметичним, наприклад зварним.

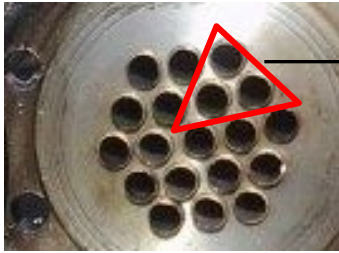
Трубна решітка обладнана патрубком для виходу повітря з простору заповнення

масла (13).

Водяний охолоджувальний контур теплообмінника (7) виконаний з трьох вертикально розташованих гофрованих трубок (далі – гофротрубки) (14) внутрішнім діаметром 32 мм (1 1/4") з низьковуглецевої аустенітної неіржавної сталі марки AISI 304 [29]. Характеристики гофротрубок зазначеного діаметра такі: товщина стінки трубки – 0,3 мм, коефіцієнт теплопровідності – 17 Вт/м\*К, питома теплоємність за температури 100 °С – 504 Дж/(кг\*К), внутрішній об'єм 0,982 дм<sup>3</sup>/ на 1 пог.м, площа зовнішньої поверхні – 0,204 м<sup>2</sup>/на 1 пог.м (для прикладу – гладка трубка діаметром 32 мм має площу зовнішньої поверхні 0,1 м<sup>2</sup>/на 1 пог.м). Гофротрубки є сполученими посудинами, вони герметично припаяні нижніми кінцями до нижньої трубчастій решітці, яка герметично перекриває доступ підведеної води до масляного контуру теплообмінника. Вода підводиться до водяного контуру в нижній частині корпусу теплообмінника за допомогою магістралі для подавання води (12).

Поперечний переріз корпусу теплообмінника (7) являє собою рівносторонній трикутник (рис. 3, вид А–А). Гофротрубки розміщені на вершинах умовного рівнобічного трикутника. Відстань між стінками гофротрубок дорівнює значенню половини діаметра трубок. Таке ж значення має відстань від стінок гофротрубок до стінок корпусу теплообмінника. Трикутне розміщення гофротрубок вибрано з урахуванням досвіду конструювання кожухотрубних теплообмінних апаратів, де одним із стандартизованих способів розміщення застосовується спосіб правильних шестикутників (рис. 4) [30]. Такий спосіб улаштування є найбільш ефективним в частині отримання найбільшої щільності пакування труб, тобто отримання найбільшої поверхні теплообміну в корпусі теплообмінника певного розміру.





Трикутний сегмент труб, розміщених способом правильного шестикутника

Рисунок 4 – Приклад розміщення труб у трубних решітках кожухотрубних теплообмінних апаратів способом правильних шестикутників

Джерело: розроблено авторами

Усередині гофротрубки (14) на внутрішніх стінках обладнані спіральними направляючими – завихрювачами (18) з метою зменшення впливу явища плівкового кипіння води, завдяки якому теплообмін між металевою поверхнею гофротрубки та шаром води значно знижується [31]. Спіралі виготовлені з дроту діаметром 3–4 мм, кут закруту спіралі щодо горизонталі приблизно 40–50 град. Приклад застосування завихрювачів наведено на рис. 5.



Рисунок 5 – Приклад застосування завихрювачів у теплообмінних трубах опалювальних котлів

Джерело: розроблено авторами

Усередині корпусу теплообмінника (7), між гофротрубками, в геометричному центрі рівнобічного трикутника, який вони утворюють, з кроком 400 мм розміщені одна над одною 5 термопар типу ТХА (Т1-Т5) для здійснення контролю температури масла, яке надходить з резервуара 1.

У верхній частині корпусу теплообмінника для забезпечення виходу з масляного контуру охолодженого нижче температури спалаху масла встановлено патрубков (9).

З метою зменшення втрат тепла в навколишнє середовище резервуар (1), магістраль (6) та корпус теплообмінника (7) опоряджені зовні по периметру теплоізоляцією – мінеральною ватою (19) товщиною 50 мм.

Через кришку в повітряний простір резервуара (1) проведена магістраль (21) від балона (20) з вуглекислим газом, що має подаватися під час проведення експериментальних досліджень з метою зниження концентрації кисню в повітрі. Магістраль виконана з гнучкого гумового шланга внутрішнім діаметром 6,3 мм та обладнана засувкою (шаровим краном) і регулювальним редуктором для регулювання витрати вуглекислого газу.

За своїм принципом дії експериментальний теплообмінник є одноходовим із застосуванням прямотечійної схеми руху теплоносіїв [32].

Висота водяного охолоджувального контуру теплообмінника від нижньої трубної решітки до верхньої трубної решітки (15) має складати не менше ніж 2000 мм. Цей параметр вибрали з огляду на приблизні значення, отримані з таких розрахунків.

Теплове навантаження теплообмінника ( $Q_{\text{тепл}}$ ) становить 13675 кДж, для розрахунку якого було застосовано формулу [30]:

$$Q_{\text{тепл}} = m_{\text{масл}} C_{p_{\text{масл}}} \Delta T_{\text{масл}} \quad (1),$$

де  $m_{\text{масл}}$  – маса охолодженого масла, 50 кг;

$C_{p_{\text{масл}}}$  – питома середня теплоємність масла 2,735 кДж (кг К) [25];

$\Delta T_{\text{масл}}$  – різниця температури гарячого теплоносія (масла) на вході та на виході з теплообмінника (100 К).

Для утилізації 13675 кДж теплової енергії від нагрітого масла в теплообміннику має випаритися приблизно ( $m_{\text{вод}}$ ) 5,945 кг води, що знайдено за формулою:

$$m_{\text{вод}} = Q_{\text{тепл}}/L_{\text{пар}} \quad (2),$$

де  $L_{\text{пар}}$  – питома теплота пароутворення води ( $2,3 \cdot 10^6$  Дж/кг).

Таким чином, щоб вмістити таку масу води, необхідно, аби висота охолоджувального контуру (три гофротрубки) була не менше ніж 2,0 м (внутрішній об'єм трубок складає  $0,982 \text{ дм}^3$ / на 1 пог.м [29]).

Підготовка до проведення експериментальних досліджень включатиме в себе:

- монтування термопар (умовні позначення 2, та Т1–Т5 на рис. 3), під'єднання їх до інформаційно-вимірювальної системи «Термоконт» та налаштування роботи системи вимірювання температури масла;

- заповнення резервуара (1) маслом у кількості 50 кг;

- заповнення резервуара (8) водою об'ємом 20 л;

- заповнення водяного охолоджувального контуру (гофротрубок) (14) теплообмінника водою за допомогою відкриття шарового крану (10);

- перевірку закритого положення засувок – шарових кранів (4), (16), (17) (рис. 3);

- встановлення обладнання для проведення фото- та відеозйомок;

- вимірювання та реєстрацію умов навколишнього середовища;

- перевірку цілісності захисного огороження, встановлення та попереджувальних знаків;

- підготовку засобів пожежогасіння;

- одягання оператора досліджень у захисний одяг (штани, куртка, чоботи, рукавиці, каска із захистом органів зору);

- нагрівання масла до температури  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  за допомогою ТЕНа (3);

- заповнення повітряного простору резервуара (1) вуглекислим газом, що подається з балона (20) за допомогою магістралі (21) з метою уникнення явища самозаймання розігрітого масла.

Передбачається, що проведення експериментальних досліджень буде здійснюватися в такій послідовності:

1. За допомогою регулювального редуктора (22) та крана (23) встановлюють подавання вуглекислого газу до повітряного простору резервуара (1).

2. Під час досягнення температури масла  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  у резервуарі (1) відкривають шаровий кран (4). За допомогою нього та користуючись витратоміром (5), встановлюють витрату масла таким чином, щоб 50 л масла за час не менше ніж 900 с витекло через масляний контур теплообмінника (7).

3. Фіксують за допомогою інформаційно-вимірювальної системи «Термоконт»:

- температуру масла в нижній точці (на дні) масляного контуру теплообмінника;

- зміну температури масла на верхніх ділянках масляного контуру теплообмінника завдяки теплообміну з водяним контуром, в якому відбувається нагрівання та кипіння води;

- досягнення температури масла нижче температури спалаху ( $150 \text{ }^\circ\text{C}$ ) на верхніх ділянках масляного контуру.

4. Фіксують приблизну висоту рівня шару масла, охолодженого нижче температури спалаху ( $150 \text{ }^\circ\text{C}$ ) за допомогою показів термопар.

5. Експериментальні дослідження тривають до моменту повного витікання масла із резервуара (1).

6. Після отримання результатів воду та залишки масла зливають з водяного та масляного контурів теплообмінника (7) в ємності, відкривши шарові крани (16) та (17).

Під час підготовки та проведення експерименту проводять фотофіксацію.

За результат дослідження приймають отриману висоту рівня шару масла, охолодженого нижче температури спалаху ( $150 \text{ }^\circ\text{C}$ ), значення результатів визначення температури масла та будують залежність зміни температури масла від часу.

**Висновки та напрями подальших досліджень.** Наведена методика експериментальних досліджень обґрунтування параметрів теплообмінної системи для зниження температури



трансформаторного масла нижче температури спалаху у маслоприймачі трансформаторної підстанції дає змогу визначити зміну температури трансформаторного масла у теплообміннику від 250 °С до значення, що нижче температури спалаху (150 °С),

протягом 900 с. Надалі передбачається провести експериментальні дослідження за цією методикою та здійснити оцінювання отриманих результатів, наведених експериментальних досліджень, що буде предметом наступної публікації.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Інформація стосовно пожеж та надзвичайних ситуацій, які сталися на підприємствах паливно-енергетичного комплексу упродовж 2017–2021 років. URL : <https://www.mev.gov.ua/taxonomy/term/95?page=5> (дата звернення : 10.08.2022).
2. Інформація стосовно пожеж та надзвичайних ситуацій, які сталися на підприємствах паливно-енергетичного комплексу станом на 01.12.2021. URL : <https://www.mev.gov.ua/taxonomy/term/95/document> (дата звернення : 10.08.2022).
3. Правила улаштування електроустановок. Київ : Міненерговугілля України, 2017. 617 с.
4. Fire hazard testing. Part 1-40. Guidance for assessing the fire hazard of electrotechnical products. Insulating liquids : IEC 60695-1-40 : 2013. International Electrotechnical Commission. 2013. 64 p.
5. Правила устройства электроустановок. Астана : Министерство энергетики и минеральных ресурсов Республики Казахстан, 2015. 391 с.
6. Power installations exceeding 1 kV AC and 1,5 kV DC. Part 1. AC. : EN IEC 61936-1:2021. European Electrotechnical Committee for Standardization. 2021. 118 p.
7. Guide for Substation Fire Protection: IEEE 979. New York, USA. Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2012. 99 p.
8. Recommended Practice for Fire Protection for Electric Generating Plants and High Voltage Direct Current Converter Stations : NFPA 850 Quincy, MA, USA. National fire protection association. 2020. 82 p.
9. Guide for Transformer Fire Safety Practices, Working Group A2.33, Paris, France. 2013. 139 p. URL : [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) (дата звернення : 11.04.2023).
10. Силові установки понад 1 кВ змінного струму. Частина 1. Загальні правила : ДСТУ EN 61936-1:2022 (EN 61936-1:2010, IDT; IEC 61936-1:2010, MOD) [Чинний з 01.01.2024] Київ: ДП УкрНДНЦ. 2022. 104 с.
11. Правила пожежної безпеки в компаніях, на підприємствах та в організаціях енергетичної галузі України : наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України 26.09.2018 № 491. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0328-19#Text> (дата звернення : 11.04.2023).
12. СОУ-Н ЕЕ 40.1-21677681-88:2013. Правила будови електроустановок. Пожежна безпека електроустановок. Інструкція (НАПБ В.01.056-2013/111). Наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України 21.10.2013 № 756. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0756732-13#Text> (дата звернення : 11.04.2023).
13. Зозуля Д. В. Разработка и научное обоснование технических предложений по повышению надёжности, энергетической эффективности и продлению ресурса трансформаторов ТНЦ-1250000/330 на блоках АЭС Украины. *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля*. Чорнобиль, 2013. Вип. 20. С. 57–67.
14. Заїка П., Заїка Н, Лукашів Т. Особливості пожежної небезпеки трансформаторів. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій*: матеріали XII Міжнародної наук.-практ. конф., м. Черкаси, 2021 : ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. Черкаси, 2021. С. 176–178.
15. Ніжник В. В., Поздєєв С. В., Жартовський С. В., Фещук Ю. Л. Оцінювання небезпеки поширення пожежі на суміжні будівельні об'єкти за критерієм теплового потоку. *Міжнародний науковий журнал : Інтернаука*. Київ, 2019. № 11(73). С. 47–51.
16. Experimental Study on Burning Characteristics of the Large-Scale Transformer Oil Pool Fire with Different Extinguishing Methods / Wu Chuanping, Zhou Tiannian, Chen, Baohui, Liu, Yu, Liang, Ping. *Fire technology*. Norwell, Jan 2021. Vol. 57. Ed. 1. P. 461–481.
17. Experimental study on vertical spill fire characteristics of transformer oil under continuous spill condition / Li Liyang, Xu Zhai, Juncai Wang, Peng Chen, Congling Shi. *Process Safety and Environmental Protection*. IF6.158, Pub Date : 2021-10-28.
18. Ruibang Sun, Juncai Wang, Xing Yang, Peng Chen. Experimental Research on the Combustion Characteristics of Transformer Oil Jet Fires in Oil-Filled Equipment under Heat. *ACS Omega*, 16 Nov 2021, 6(47).
19. Ruibang Sun, Juncai Wang, Xing Yang, Peng Chen, Liusuo Wu. Experimental study on geometric characteristics of transformer oil jet fire under external heat source. *Energy Sources, Part A : Recovery, Utilization, and Environmental Effects* (IF3.447), 13 Oct. 2021.
20. Experimental Study on the Burning Characteristics of Transformer Oil Pool Fires / Jinlong Zhao, Shansheng Wang, Jianping Zhang, Rui Zhou, Rui Yang. *Energy Fuels*. 2020, 34, 4, 16 March 2020. P. 4967–4976.
21. Justification of minimum parameters of gravel backfill of the oil receiver of the transformer substation / R. Klymas , V. Nizhnyk , O. Nekora, V. Nekora, I. Stylyk. *The Scientific heritage*. Budapest, Hungary, 2021. Vol. 3. № 79(79). P. 36–44.
22. Провести пошукову дослідження умов самозгасання полум'я рідких вуглеводнів, покритих дрібновічковими сітками : Звіт про Наукову дослідну роботу. № державної реєстрації 0196U009041. Український науково-дослідний інститут пожежної безпеки Міністерства внутрішніх справ України. Київ, 1997.
23. Розрахунок процесу газообміну під час горіння рідин, що містяться в ємностях, покритих дрібновічковими сітками / О. В. Мельник, С. В. Кутеко, А. М. Басаєв. *Науковий вісник УкрНДНЦ*, 2009. № 2(20). С. 57–61.
24. Аналіз умов самозгасання полум'я рідких вуглеводнів у напівзамкнених об'ємах АПБУ / А. Я. Шаршанов, О. В. Бабенко, Ю. В. Луценко. *Проблеми пожежної безпеки*. 2001. С. 109–112. URL : <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/4050> (дата звернення : 14.11.2023).
25. Енергомережа: вебсайт. URL: [http://www.energynet.com.ua/transformatornye\\_masla\\_nynas/nytro\\_11gx.html](http://www.energynet.com.ua/transformatornye_masla_nynas/nytro_11gx.html) (дата звернення : 11.04.2023).

26. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справ. / А. Н. Баратов, А. Я. Корольченко, Г. Н. Кравчук и др. Изд.: в 2 книгах; кн. 1. М. : Химия, 1990. 496 с.
27. Fluids for electrotechnical applications – Mineral insulating oils for electrical equipment. IEC 60296:2020. 82 p.
28. Климаць Р. В. Визначення безпечної величини температури трансформаторного масла. *Scientific Collection «InterConf»*, (94) : with the Proceedings of V International scientific and practical conference «Science, education, innovation : topical issues and modern aspects». Tallinn, Estonia: Üningu Teadus Juhatus, 2021. P. 574–578.
29. Кофулсо : вебсайт. URL: [http://kofulso.com.ua/dir\\_info.htm](http://kofulso.com.ua/dir_info.htm) (дата звернення : 14.11.2023).
30. Кожухотрубний теплообмінник : методичні вказівки до виконання розрахункової частини курсового проекту з дисципліни «Теплотехнічні процеси та установки» для студентів усіх форм навчання спеціальності «Енергетичний менеджмент» / Т. О. Ринкова, В. П. Баб'як , В. І. Шкляр. Київ : Політехніка, 2005. 50 с.
31. Толубинский В. И. Теплообмен при кипении. Киев : Наукова думка, 1980. 316 с.
32. Конструювання та розрахунок кожухотрубчастих теплообмінних апаратів / В. В. Іванченко, О. І. Барвін, Ю. М. Штонда. Луганськ : видавництво СНУ ім. В. Даля. 2006. 208 с.

## REFERENCES

1. Informatsiia stosovno pozhezh ta nadzvychainykh sytuatsii, yaki stalysia na pidpriemstvakh palyvno-enerhetychnoho kompleksu uprodovzh 2017-2021 rokiv. (2022). [Information on fires and emergency situations that occurred at enterprises of the fuel and energy complex during 2017-2021] Retrieved from <https://www.mev.gov.ua/taxonomy/term/95?page=5>.
2. Informatsiia stosovno pozhezh ta nadzvychainykh sytuatsii, yaki stalysia na pidpriemstvakh palyvno-enerhetychnoho kompleksu stanom na 01.12.2021. (2022). [Information on fires and emergency situations that occurred at the enterprises of the fuel and energy complex as of 01.12.2021]. Retrieved from <https://www.mev.gov.ua/taxonomy/term/95/document>.
3. Pravyla ulashtuvannya elektroustanovok [Rules for Arrangement of Electrical Installations] (2017). Kyiv: Minenergougillya of Ukraine [in Ukrainian].
4. Fire hazard testing. Part 1-40. Guidance for assessing the fire hazard of electrotechnical products. Insulating liquids. (2013) IEC 60695-1-40:2013: International Electrotechnical Commission. 2013 [in English].
5. Pravila ustrojstva jelektroustanovok. [Rules for Arrangement of Electrical Installations] (2015). Astana: Ministry of Energy and Mineral Resources of the Republic of Kazakhstan [in Russian].
6. Power installations exceeding 1 kV AC and 1,5 kV DC. Part 1. AC. (2021) EN IEC 61936-1:2021. European Electrotechnical Committee for Standardization. 2021 [in English].
7. Guide for Substation Fire Protection (2012). IEEE 979. New York, USA. Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2012 [in English].
8. NFPA 850 Recommended Practice for Fire Protection for Electric Generating Plants and High Voltage Direct Current Converter Stations. Quincy, MA, USA. National fire protection association. 2020 [in English].
9. Guide for Transformer Fire Safety Practices, Working Group A2.33, Paris, France. 2013. 139 p. 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].
10. Sylovi ustanovky ponad 1 kV zminnogo strumu. Chastyna 1. Zahalni pravyla [Power installations exceeding 1 kV a.c. - Part 1: Common rules] DSTU EN 61936-1:2022 (EN 61936-1:2010, IDT; IEC 61936-1:2010, MOD) from 1<sup>st</sup> January 2024. Kyiv: SE UkrNDNC [in English].
11. Pravyla pozheznoi bezpeky v kompaniiakh, na pidpriemstvakh ta v orhanizatsiiakh enerhetychnoi haluzi Ukrainy. Nakaz Ministerstva enerhetyky ta vuhilnoi promyslovosti Ukrainy 26.09.2018 № 491 [Rules of fire safety in companies, enterprises and organizations of the energy industry of Ukraine. Order of the Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine 26.09.2018 No. 491] Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0328-19#Text> [in Ukrainian].
12. SOU-N EE 40.1-21677681-88:2013. Pravyla budovy elektroustanovok. Pozhezna bezpeka elektroustanovok. Instruksiiia (NAPB V.01.056-2013/111) Nakaz Ministerstva enerhetyky ta vuhilnoi promyslovosti Ukrainy 21.10.2013 № 756 [SOU-N EE 40.1-21677681-88:2013. Rules for the construction of electrical installations. Fire safety of electrical installations. Instruction (NAPB V.01.056-2013/111) Order of the Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine dated October 21, 2013 No. 756] [in Ukrainian].
13. Zozulja, D.V. (2013) Razrabotka i nauchnoe obosnovanie tehniceskikh predlozhenij po povyseniju nadjozhnosti, jenergeticheskoj jeffektivnosti i prodleniju resursa transformatorov TNC-1250000/330 na blokah AJeS Ukrainy [Development and scientific substantiation of technical proposals for improving the reliability, energy efficiency and extending the service life of TNTs-1250000/330 transformers at NPP units of Ukraine]. Collection: *Safety problems of nuclear power plants and Chernobyl*. Chornobyl [in Russian].
14. Zaika P., Zaika N, Lukashiv T. (2021) Osoblyvosti pozheznoi nebezpeky transformatoriv. [Fire hazard features of transformers], *Teoriia i praktyka hasinnia pozhez ta likvidatsii nadzvychainykh sytuatsii [Theory and practice of fire extinguishing and liquidation of emergency situations*. Proceedings of the 12th International Scientific and Practical Conference. Cherkasy: CHIPB named after Heroes of Chornobyl National University of Civil Defense of Ukraine [in Ukrainian].
15. Nizhnyk, V.V., Pozdieiev, S.V., Zhartovsky, S.V., & Feshchuk, Yu.L. (2019). Otsiniuvannia nebezpeky poshyrennia pozhezhi na sumizhni budivelni obiekty za kryteriiem teplovoho potoku. Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal: Internauka. [Assessment of the risk of fire spreading to adjacent construction sites according to the criterion of heat flow. *International scientific journal: Internauka*] Kyiv: 11 (73), 47-51. doi: 10.25313/2520-2057-2019-11-5113 [in Ukrainian].
16. Wu Chuanping ; Zhou Tiannian ; Chen, Baohui ; Liu, Yu ; Liang, Ping (2021) Experimental Study on Burning Characteristics of the Large-Scale Transformer Oil Pool Fire with Different Extinguishing Methods. *Fire technology*; Norwell Volume 57, Ed. 1, 461-481. doi: 10.1007/s10694-020-01012-x [in English].
17. Li Liyang, Xu Zhai, Juncai Wang, Peng Chen, Congling Shi (2021) Experimental study on vertical spill fire characteristics of transformer oil under continuous spill condition. *Process Safety and Environmental Protection* (IF6.158), 521-530. doi: 10.1016/j.psep.2021.10.044 [in English].
18. Ruibang Sun , Jyncai Wang, Xing Yang, Peng Chen (2021). Experimental Research on the Combustion Characteristics of Transformer Oil Jet Fires in Oil-Filled Equipment under Heat. *ACS Omega*, 16. 6 (47). 31843-31853. doi: 10.1021/acsomega.1c04551 [in English].

19. Ruibang Sun, Juncai Wang, Xing Yang, Peng Chen, Liusuo Wu (2021) Experimental study on geometric characteristics of transformer oil jet fire under external heat source. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* (IF3.447), doi: 10.1080/15567036.2021.1991053/ [in English].
20. Jinlong Zhao, Shansheng Wang, Jianping Zhang, Rui Zhou, Rui Yang (2020) Experimental Study on the Burning Characteristics of Transformer Oil Pool Fires. *Energy Fuels*, 34, 4, 4967–4976. doi: 10.1021/acs.energyfuels.0c00175 [in English].
21. R. Klymas, V. Nizhnyk, O. Nekora, V. Nekora, I. Stylyk (2021). Justification of minimum parameters of gravel backfill of the oil receiver of the transformer substation. *The Scientific heritage*. Budapest, Hungary. Vol. 3. № 79 (79). 36–44 [in English].
22. Provesty poshukovi doslidzhennia umov samozghasannia polumia ridkykh vuhlevodniv, pokrytykh dribnovichkovyvy sitkamy: Zvit pro Naukovu doslidnu robotu [To conduct exploratory studies of the self-extinguishing conditions of the flame of liquid hydrocarbons covered with fine-mesh nets: Report on Scientific research work; State registration number 0196U009041. Ukrainian Research Institute of Fire Safety of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine]. Kyiv, 1997 [in Ukrainian].
23. Melnyk, O. V.; Kuteko, S. V.; Basaev, A. M. (2009) Rozrakhunok protsesu hazoobminu pid chas horinnia ridyn, shcho mistiatsia v yemnostiakh, pokrytykh dribnovichkovyvy sitkamy. *Naukovi visnyk* [Calculation of the gas exchange process during combustion of liquids contained in containers covered with fine-mesh nets. *Scientific Bulletin of UkrNDIPB*], No. 2(20), 57–61 [in Ukrainian].
24. Sharshanov, A.Ia., Babenko, O.V., Lutsenko, Yu.V. (2001) Analiz umov samozghasannia polumia ridkykh vuhlevodniv u napivzamknenykh ob'iemakh APBU [Analysis of the self-extinguishing conditions of the flame of liquid hydrocarbons in semi-closed volumes APBU/Problems of fire safety] Retrieved from <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/4050> [in Ukrainian].
25. Retrieved from [http://www.energynet.com.ua/transformatornye\\_masla\\_nynas/nytro\\_11gx.html](http://www.energynet.com.ua/transformatornye_masla_nynas/nytro_11gx.html) [in English].
26. Baratov, A.N., Korolchenko, A.Ya., Kravchuk, H.N. et al. (1990). *Pozharovzryvopasnost' veshhestv i materialov i sredstva ih tusheniya* [Fire and explosion hazard of substances and materials and means of their extinguishing]: Ref. ed.: in 2 books; book 1. Moscow: Chemistry [in Russian].
27. Fluids for electrotechnical applications. Mineral insulating oils for electrical equipment. IEC 60296:2020 [in English].
28. Klymas R.V. (2021) Vyznachennia bezpechnoi velychyny temperatury transformatornogo masla [Determination of the safe temperature value of the transformer oil. *Scientific Collection «InterConf»*, (94): with the Proceedings of V International scientific and practical conference «Science, education, innovation: topical issues and modern aspects». Tallinn, Estonia: Üningu Teadus Juhatus [in Ukrainian].
29. Retrieved from [http://kofulso.com.ua/dir\\_info.htm](http://kofulso.com.ua/dir_info.htm).
30. Rynkova T.O., Babiak V. P., Shkliar V. I. (2005) Kozhukhotrubnyi teploobminnyk: Metodichni vkazivky do vykonannia rozrakhunkovoi chastynty kursovoho proektu z dystsypliny «Teplotekhnichni protsesy ta ustanovky» dlia studentiv usikh form navchannia spetsialnosti «Enerhetychni menezhment» [Shell-and-tube heat exchanger: Methodological instructions for the implementation of the calculation part of the course project in the discipline «Heat engineering processes and installations» for students of all forms of education in the specialty «Energy Management»]. Kyiv: IVC «Polytechnic Publishing House» [in Ukrainian].
31. Tolubinsky, V.I. (1980) Teploobmen pri kipenii [Heat exchange during boiling]. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
32. Ivanchenko V.V., Barvin O.I., Shtonda Yu.M. (2006) Konstruiuvannia ta rozrakhunok kozhukhotrubchastykh teploobminnykh aparativ [Design and calculation of shell-and-tube heat exchangers]. Luhansk: SNU publishing house named after V. Dal [in Ukrainian].

## METHODOLOGY OF EXPERIMENTAL STUDIES FOR THE JUSTIFICATION OF SYSTEM PARAMETERS FOR REDUCING THE TEMPERATURE OF THE TRANSFORMER OIL BELOW THE FLASH TEMPERATURE IN THE OIL RECEIVER

*P. Illiuchenko, V. Nizhnyk, O. Nikulin*

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

**KEYWORDS:** ANNOTATION

transformer  
substation, oil  
receiver, gravel  
backfill, heat  
exchanger.

The statistics of fires involving oil-filled electrical equipment at enterprises of the fuel and energy complex that occurred in Ukraine during 2017–2021 are provided. The main causes of fires at transformer substations have been identified. The existing approaches to limiting the spread of fire at oil-filled transformer substations in terms of methods of structural arrangement of oil collectors with gravel filling of certain parameters, which are used in Ukraine and beyond, are analyzed. The main drawback of using gravel backfill as a way to reduce the emergency temperature of transformer oil to safe values has been identified – the resource-consuming periodic complex of works to keep it clean. An analysis of the latest publications and researches related to the improvement of fire safety of transformer substations, assessment of transformer oil combustion regimes and issues of extinguishing flammable liquids was carried out. On the basis of analytical studies, a schematic diagram of an experimental installation – a heat exchange system (heat exchanger) was developed, which should ensure a decrease in the temperature of heated oil from 250 °C to below the flash point of 150 °C during the passage of oil through the heat exchanger for 900 s. The project of the methodology of experimental research and substantiation of the parameters of the heat exchange system (heat exchanger) was developed to reduce the temperature of the transformer oil below the flash point in the oil receiver of the transformer substation with the function of diverting oil to the oil sump. The method makes it possible to determine changes in the temperature of the transformer oil from 250 °C to below the flash point (150 °C) during the passage of the oil through the heat exchanger for 900 s.

УДК 614.842/.847:331.43

## ОСОБЛИВОСТІ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ НА ОБ'ЄКТАХ І СПОРУДАХ ІЗ НАЯВНІСТЮ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

<https://doi.org/10.33269/nvcs.2023.1.128-140>

Кодрик А. І., ORCID iD 0000-0002-3787-5674

Борисов А. В\*, ORCID iD 0000-0001-6858-0492

Тітенко О. М., ORCID iD 0000-0002-4950-8580

Іллюченко П. О., ORCID iD 0000-0001-6687-6388

\*E-mail: andr.borisov@ukr.net

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

### ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ АНОТАЦІЯ

*Надійшла до редакції:*

24.04.2022

*Пройшла рецензування:*

20.05.2022

### КЛЮЧОВІ СЛОВА:

безпека праці, енергетичний об'єкт, нормативне забезпечення, пожежогасіння, сонячна електростанція

У Законі України «Про альтернативні джерела енергії» визначені види альтернативних джерел енергії. Для нашої країни найбільш актуальним є застосування сонячної та вітрової енергії. Проведено аналіз світового досвіду щодо управління та організації гасіння пожеж в електроустановках під напругою. Розглянуто особливості гасіння пожеж на об'єктах із наявністю сонячних та вітрових електростанцій. Проаналізовано вітчизняні та зарубіжні праці за цим напрямом. Встановлено, що на сьогодні доступною є інформація (як вітчизняна, так і закордонна), що стосується вітрових та сонячних станцій, проте іншим об'єктам альтернативної енергії мало приділяється уваги. Проаналізовано нормативні документи щодо будівництва об'єктів альтернативної енергії, їх експлуатації, а також щодо організації гасіння цих об'єктів та забезпечення безпечних умов праці особового складу оперативно-рятувальних підрозділів. Об'єкти альтернативної енергії мають загальні складові частини (обладнання для перетворення електроенергії) з традиційними енергогенеруючими об'єктами, які є загальновідомими та використовуються в різних галузях господарства. Для них розроблено інструкції з гасіння пожеж [1–3], що можуть застосовуватись на об'єктах сонячної та вітрової енергії. Визначено особливості, що відрізняють гасіння пожеж на об'єктах з альтернативною енергетикою від енергетичних об'єктів, що працюють на викопному паливі та є основними причинами виникнення аварій. Насамперед це наявність у системі постійного струму, що виробляється навіть під час вимикання розподільних пристроїв, перегрів кабельних мереж і можливість виникнення короткого замикання. Щодо вітрових електростанцій, то на гасіння пожеж впливають їх розміри, віддаленість від населених пунктів, метеорологічні умови. Наведено можливі сценарії дій оперативних підрозділів під час гасіння пожежі, ступені ризику виникнення загроз та заходи щодо їх усунення.

### Постановка проблеми.

Аналізуючи наведену на рис. 1 динаміку росту об'єктів відновлюваної електроенергетики в Україні, відзначимо, що найпоширенішими з них, які

використовують альтернативні джерела, є сонячні електростанції та вітрові електростанції, малі гідроелектростанції та біоенергетика.

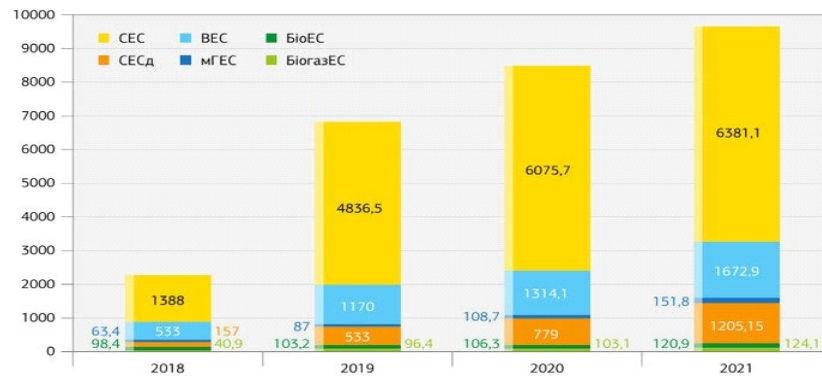


Рисунок 1 – Динаміка розвитку об’єктів альтернативної енергетики та їх структура

Наведені види енергетичних об’єктів є потенційно пожежонебезпечними, та кожен із них має свої особливості, які потрібно враховувати під час ухвалення рішень та проведення робіт з ліквідації надзвичайних ситуацій. Рівень пожежонебезпечності енергетичних об’єктів, в яких використовуються альтернативні джерела енергії, різний і залежить від технології отримання енергії, типу електрогенеруючих пристроїв, конструктивного виконання та розмірів об’єктів.

Нині в Україні немає нормативних документів, у яких би враховувались особливості гасіння пожеж та проведення робіт з ліквідації надзвичайних ситуацій на об’єктах альтернативної енергетики.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогодні кількість доступних публікацій, в яких досліджуються питання особливостей гасіння пожеж на об’єктах з наявністю альтернативних джерел енергії, обмежена. Серед вітчизняних праць, в яких приділяється увага цьому питанню, можна відзначити Методичні рекомендації [4], розроблені фахівцями ГУ ДСНС України в Хмельницькій області, та наукові публікації «Питання безпечного гасіння пожеж на об’єктах з наявністю сонячних електростанцій» [5], «До питання безпечного гасіння пожеж на об’єктах з наявністю сонячних електростанцій» [6], автори яких вказують на стрімкий розвиток альтернативних джерел енергії як в Україні, так і в усьому світі.

**Методи дослідження.** В роботі використано аналітичні методи досліджень, зокрема аналіз

і узагальнення вимог вітчизняних та закордонних нормативних документів щодо ефективності організації оперативно-тактичних дій пожежно-рятувальними підрозділами під час гасіння об’єктів альтернативних джерел енергії.

**Формулювання цілей дослідження:** проведення аналізу вимог вітчизняних і закордонних нормативних документів щодо гасіння та організації оперативно-тактичних дій пожежно-рятувальних підрозділів на об’єктах альтернативних джерел енергії із наявністю сонячних та вітрових джерел, забезпечення безпечних умов праці особового складу. Визначення відмінностей, які можуть впливати на порядок організації процесу гасіння та на безпеку пожежників під час роботи на об’єктах з використанням наведених джерел енергії.

Об’єктом досліджень є процеси гасіння пожеж на об’єктах альтернативної енергетики, предметом досліджень є порядок дій пожежно-рятувальних підрозділів під час гасіння пожеж на цих об’єктах.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

*Особливості ліквідації надзвичайних ситуацій та гасіння пожеж на об’єктах і спорудах із використанням сонячних джерел вироблення електроенергії*

Фактично всі пожежі в системах вироблення електроенергії з використанням енергії сонця спричинені дуговими замиканнями постійного струму [4; 7–10], які виникають тільки в сонячних системах постійного струму. Звичайні



сонячні електростанції (далі – СЕС) можуть генерувати до 600В постійного струму високої напруги.



а)



б)

Рисунок 2 – Варіанти розташування та склад промислових СЕС: а – на землі та склад; б – на дахах приміщень

Під час ліквідації пожежі на сонячних електростанціях [4] та в домогосподарствах із сонячними панелями для забезпечення безпеки пожежників необхідно дотримуватися такої послідовності дій: провести розвідку місця пожежі, обійти всю територію будівлі з метою виявлення місця розташування сонячних панелей, обладнання для перетворення енергії та обладнання для її накопичування. Сучасні сонячні панелі можуть бути вмонтовані в конструкцію покрівлі й бути непомітними, зокрема в темний час та в умовах підвищеної задимленості, тому пожежники можуть дізнатися, що вони встановлені на будівлі тільки діставшись даху. Акумуляторні батареї зазвичай мають встановлюватися зовні будівлі, в підвалі або гаражі. Варто знайти схеми розташування обладнання, які можуть бути в розподільному щиті. На жаль, в Україні немає вимог до власників будівель щодо розміщення на видному місці основної інформації про фотоелектричну систему – схему підключення, розташування окремих

елементів та кабелів, а також розміщення поруч із інвертором та іншим обладнанням.

Слід відключити електроживлення будівлі, вимикачі від постійного та змінного струму від сонячних батарей та акумуляторних батарей. Дуже важливо відключити всі системи, тому що у разі відключення тільки основного вимикача буде генеруватися зворотний електричний струм від акумуляторних батарей, а це небезпечно для пожежників. Водночас необхідно брати до уваги, що інвертори і вимикачі постійного струму часто встановлюються на верхньому поверсі будівлі або на/під дахом. Ймовірно вони не будуть доступними для пожежників, які здійснюють гасіння пожежі в будівлі.

Якщо приміщення, де розташовані акумуляторні батареї, перебувають під загрозою дії вогню, можливе виділення небезпечних газів, тому необхідно ретельно провітрити його і тільки після цього розпочинати гасіння пожежі.

Необхідно зауважити, що навіть повністю відключена сонячна батарея може генерувати електричний струм вдень від сонця, а вночі від потужних освітлювальних пристроїв та від світлового випромінювання близького вогнища [4; 7; 10]. Пожежникам доведеться припустити щодо кожної установки, що її вимкнено не було.

Як превентивні заходи необхідно наносити на поверхню сонячних панелей компресійну піну, яка має велику адгезію навіть до похилих поверхонь. Це блокує генерацію електричного струму від будь-яких джерел світлового випромінювання. Використання звичайної піни як світлонепроникного захисту не є ефективним через низьку адгезію та внаслідок стікання. Використання брезенту як ізолювального матеріалу можливе тільки за нульової швидкості вітру та невеликих розмірів сонячних панелей.

Відповідно до чинних норм сонячні електростанції можна гасити водою так само, як і інше електрообладнання напругою до 400 В, а саме:

-відстань 1 м між пожежником та електричним пристроєм під час гасіння розпиленими струменями води;

-відстань 5 м між пожежником та електроприладом, підключеним до електрики, під час гасіння компактними струменями води [1; 3; 10].

Фотоелектричні модулі є вогнетривкими і не сприяють поширенню вогню. З огляду на це засоби пожежогасіння застосовуються безпосередньо до них лише у разі пожежі на даху будівлі, на якому вони встановлені. Необхідно брати до уваги, що сонячні панелі досить міцні. Це ускладнює використання звичайної стратегії пожежогасіння в будівлі – пробивання отворів у стелі для випускання тепла та диму. Сонячні панелі, навіть сухі, є дуже слизькими, що створює для пожежників небезпеку падіння з даху. Якщо сонячні панелі встановлені на відстані від покрівлі, це становить велику загрозу для накопичення під панелями горючого сміття, внаслідок чого можливий швидкий розвиток пожежі навіть від маленької іскри.

Якщо дах будівлі зазнає пожежі, то додаткове механічне навантаження через

вагу сонячних панелей або додаткове навантаження від вітру може спричинити його раннє обвалення. Існує ризик, що панелі або скло можуть впасти на пожежників.

*Небезпеки, які загрожують аварійним службам у разі виникнення пошкодження*

Згідно з [10; 12] можливі небезпеки для працівників оперативно-рятувальних підрозділів, які перебувають у місця розташування фотогальванічних систем, відносять до дев'яти можливих категорій відповідно до схеми таких небезпек, як інгаляційне отруєння, тривожність, поширювання пожежі, іонізуюче випромінювання, хімічні речовини, травмування, вибух, електрика та обвалення конструкцій.

Небезпеки, пов'язані з ураженням електричним струмом, під час гасіння пожеж на фотогальванічних системах потрібно розглядати для різноманітних сценаріїв, також слід вживати належних заходів для захисту персоналу підрозділів.



Рисунок 3 – Займання проводки та трансформаторів на території фотоелектричної станції в Херсонській області

Генерування електричної напруги на фотогальванічних модулях може спричинити не тільки інсоляція. Небезпечні значення напруги можуть виникати навіть під час використання штучного освітлення, як у разі освітлення місця пожежі. Цій небезпеці можна протидіяти дотриманням достатньої відстані між освітлювальними приладами і модулями. Контактна безпечність фотогальванічних систем надзвичайно важлива у разі розташування сонячної батареї на покриттях будівель. Ураження електричним струмом, зокрема на покрівлях, а також падіння будівлі можуть

призвести до тяжких травм. Вплив пожежі, а також механічні причини, такі як гроза, можуть пошкодити електричні лінії фотогальванічних систем незалежно від типу або способу їх монтування (наприклад, монтування на покритті будівлі або стіні, системи, розміщені на відкритому просторі).

Використання різноманітного (електропровідного) робочого обладнання може призвести до пошкодження фотогальванічних модулів і, як наслідок, до безпосереднього контактування з частинами, які перебувають під напругою.

Під час гасіння пожеж, а також виконання робіт із надання технічної допомоги може виникнути потреба в доступі до покриття будівлі, наприклад для прибирання снігу, можливе ставання ногами на поверхні модуля. З огляду на це слід розуміти, що статичне навантаження є

небезпечним. Наявність у модулі пошкоджень, що виникли раніше або сталися через ставання на нього, може призвести до контактування з частинами, на яких є напруга безпосередньо або опосередковано.



Рисунок 4 – Пожежа сонячних панелей на даху будівлі

Пошкодження внаслідок пожежі або механічних впливів може призвести до виникнення електродугових розрядів. Велика кількість енергії, що виділяється в умовах температур електродугового розряду величиною в декілька тисяч градусів, може призвести до опіків або тимчасового пошкодження очей (унаслідок спалаху).

Затоплення компонентів фотогальванічної системи може призвести до контактування частин, які перебувають під напругою. В такому разі стає можливим перенесення напруги на предмети, які перебувають в безпосередній близькості від затоплених частин системи.

*Особливості гасіння пожеж*  
Вогнегасні речовини, які подаються на

пошкоджені частини системи, можуть спричинити передавання напруги незалежно від типу установки. Завдяки низькій електропровідності струменя води передавання напруги відбувається тільки у разі збігу декількох несприятливих параметрів.

З цієї причини ймовірність настання події доволі низька. З іншого боку, травми внаслідок її настання можуть бути тяжкими. Інколи гасіння пожежі може потребувати розкриття покриття будівлі з тактичних міркувань.

З огляду на це може виникнути контактування з частинами фотогальванічних систем, які перебувають під напругою, якого потрібно уникати.



Рисунок 5 – Гасіння пожежі на фотогальванічній системі, змонтованій на житловому будинку, та виникнення контактної пожежі



Пожежі на фотогальванічних системах, розміщених на відкритому просторі, можуть спричинити небезпечні пошкодження інверторами або трансформаторними станціями, а також станціями живлення [4; 11–14]. Загалом на цих «станціях помірної напруги» значення напруги можуть досягати 20 кВ. Зазвичай частини системи на виході високої напруги оснащують знаками безпеки і захищають від несанкціонованого доступу.

Зона уламків – це небезпечна зона, в яку уламки можуть падати дотолу. Під час надзвичайних ситуацій, які супроводжуються пошкодженнями (пожежі, землетруси, змивання тощо), у зонах уламків є небезпека для життя. Перебування в них рекомендоване тільки для негайного порятунку людей або підпирання чи розбивання уламків. Наприклад, фасадні стіни можуть легко завалитися, якщо решта конструкцій будівлі прослабла або вже не існує.

Виконання операцій може потребувати ставання на покриття будівлі та навіть на модулі. Потрібно припускати, що поверхні покриттів будівель, щодо яких не вжито додаткових заходів безпеки, зумовлюють ризик падіння. Модулі зазвичай не розраховано на напруження, яке виникає у разі ставання на них. Крім того, модулі можуть падати донизу крізь пошкоджені конструкції покриттів будівель.

У разі пожежі термічні напруження, зумовлені, наприклад, проникненням вогню крізь модуль або холодною водою, що подається на гасіння, можуть спричинити надзвичайно високе напруження у склі модуля, що надалі може призвести до його вибухоподібного руйнування з утворенням дрібних уламків скла. Це пов'язано з небезпекою травмування. Механічне напруження у склі, спричинене зміщенням та змінюванням кута ухилу, також може призвести до утворення більш дрібних частинок під час прибирання уламків.

Затоплення частин фотогальванічної системи водою, яка надходить внаслідок повені або подається на гасіння, може спричинити електроліз у разі одночасної наявності напруги постійного струму між позитивною та негативною клемми

системи. В такому разі утворюється водень (газоподібна речовина, що утворюється внаслідок електролізу), з яким пов'язана небезпека вибуху в закритому або неналежним чином вентиляваному просторі.

У разі використання літій-іонних акумуляторів за екстремальних умов усунути небезпеку «розгону» ланцюгової хімічної реакції з підвищеним накопиченням теплоти неможливо. Це може спричинити пожежу безпосередньо на самій акумуляторній батареї, можливо в режимі вибуху. У разі руйнування акумуляторної батареї потрібно прогнозувати витік токсичних та їдких хімічних речовин. Інша небезпека виникає через руйнування скла під впливом теплоти. Дрібні уламки скла та покриттів можуть розлітатися в усіх напрямках. Потрібно контролювати можливе утворення вибухонебезпечних газоподібних речовин або утворення горючої суміші.

Під час пожеж на фотогальванічних системах можна прогнозувати виділення речовин, отруйних під час вдихання, зокрема в концентраціях, більших за граничні (гранично допустимі рівні впливання). Залежно від використовуваних пластмас можлива поява високотоксичних та їдких речовин (наприклад, фтороводневої кислоти HF). Потрібно знизити концентрацію шкідливих речовин, запобігти їх вдиханню й контактуванню зі шкірою (використання захисного одягу та засобів індивідуального захисту органів дихання).

Механічне пошкодження гальванічних елементів акумуляторів може, з одного боку, призвести до витіку рідких хімічних речовин, а з іншого боку, у разі використання літій-іонних батарей виникає ризик термічного «розгону» акумулятора. Крім того, у доквілля виділяються значна кількість теплоти з утворенням вибухоподібного полум'я або навіть з вибухом, а також токсичні та їдкі речовини.

Це має велике значення у разі встановлення акумуляторних батарей у підвалах, яке трапляється часто, де необхідно забезпечувати достатню вентиляцію.

*Відключення навантаження у системах*

У разі використання інверторів, установлених у колах, функцію вимикання частково виконує сам інвертор. Вимикання кіл у цьому разі можливе за допомогою штекерного з'єднувача на вході інвертора. Зазвичай в умовах навантаження можна використовувати тільки перемикачі або вимикачі навантаження. Решту пристроїв вимикання можна використовувати тільки, якщо немає навантаження. У розподільних коробках або на інверторі можуть виникати напруги у разі обернення полярності через наявність паралельних підключень. В умовах опромінення фотогальванічної модулі [4; 7–8; 11] завжди перебувають під напругою. Сонячні елементи генерують електрику, доки до них надходять сонячні промені. Хоча за низького рівня опромінювання ця напруга дуже низька, вона швидко зростає зі збільшенням його рівня, досягаючи максимального значення. Струм, що надходить від сонячного елемента, пропорційний рівню опромінювання. На відміну від акумуляторних батарей, сонячні генератори не можна вимикати без вживання додаткових заходів. Ця особливість, яка відрізняє їх від традиційних джерел напруги, потребує певних обсягів робіт як під час монтажу та технічного обслуговування гальванічних систем, так і під час проведення рятувальних операцій у будівлях, оснащених фотогальванічними системами, або навіть на системах, установлених на відкритому просторі.

Працівники рятувальних підрозділів під час виконання робіт на електроустановках завжди повинні припускати (незважаючи на можливу наявність пристрою вимикання), що установка не знеструмлена.

Відповідно вони повинні дотримуватись перевірених основних правил стосовно наближення до електроустановок тільки на дозволenu відстань – 1 м для частин, які перебувають під напругою, на 1 м під час гасіння розпиленним струменем, на 5 м під час гасіння компактними струменями води.

Під час пожежі в будівлі, що загрожує людям, працівники рятувальних

підрозділів завжди спочатку намагатимуться провести оперативно-тактичні дії всередині відповідно до встановлених правил, а не приділятимуть першочергової уваги покриттю сонячного генератора, яке буде продовжувати виробляти електрику.

Для ізоляції світлонепроникного покриття сонячного генератора можливе застосування протипожежної піни, брезенту і навіть непрозорого гелю. Ці засоби мають свої недоліки. Протипожежна піна зазвичай не прилипає до похилих і гладких поверхонь модулів, для нанесення гелю необхідно дуже багато часу, а використання брезенту потребує практично нульової швидкості вітру і не може застосовуватися для установок з великими розмірами. Як ефективний засіб рекомендуємо використання компресійної піни, яка має великі адгезивні властивості, утримується на похилих поверхнях, має більшу стійкість та надійно ізолює від світла покриття сонячного генератора.

Вимикання електрики усередині самої фотогальванічної системи передбачає можливість вимикання і на рівні генератора, і на рівні модуля. Передбачено обидва варіанти для відключення і короткого замикання.

*Заходи щодо підвищення безпеки праці працівників оперативно-рятувальних підрозділів*

Фотогальванічні системи, розміщені на покриттях будівель, не завжди видимі, особливо в умовах сильного задимлення. Інформація щодо наявності фотогальванічної системи на будівлі є основним чинником для безпеки пожежників під час виконання робіт. Вона маркується за допомогою попереджувального знака на ділянці введення або на розподільній коробці будівлі. Ризики для пожежників виникають, зокрема, від напруги постійного струму, що утворюється в полі генератора, напруги, яка залишається після відключення від комунальної електромережі на виході постійного струму упродовж усього часу, поки світло падає на модулі.

Незважаючи на можливу наявність пристрою вимикання [10], вони повинні

завжди припускати, що напругу із системи не знято.

Необхідно розрізняти базову відстань, якої мають дотримуватися працівники рятувальних підрозділів, і відстань, яку слід витримувати під час гасіння пожеж.

Необхідно дотримуватися мінімальної відстані від усіх низьковольтних систем і компонентів систем. Якщо це можливо або якщо ситуація не є з'ясованою, то безпечну ділянку потрібно огороджувати.

У разі витримування мінімальних необхідних відстаней (1 м у разі гасіння розпиленним струменем та 5 м у разі гасіння компактним струменем) небезпека для працівників рятувальних підрозділів від небезпечних електричних струменів, що проходять через струмись вогнегасної речовини, не виникає. Необхідно пам'ятати, що вологі засоби захисту практично не забезпечують захисної ізоляції.

Затоплені водою підвальні приміщення являють собою потенційно високу небезпеку для працівників оперативно-рятувальних підрозділів. Пошкоджені кабелі фотогальванічної системи, а також такі, які провисають, можуть спричинити протікання струму через воду у разі одночасного дотику до заземлених систем. Небезпечні струми можуть проходити через тіло людини навіть за низьких значень напруги (близько 100 В).

Зважаючи на високу питому електропровідність води, смертельно небезпечні значення струму в діапазоні декількох ампер можуть виникати навіть на відстанях у декілька метрів.

Під час використання пожежних стволів у разі гасіння пожеж поблизу фотогальванічних систем працівники оперативно-рятувальних підрозділів не наражаються на суттєву небезпеку від струмів витоку через воду, яка подається на гасіння, за напруги 1000 В постійного струму за умови дотримання безпечних значень.

Необхідно пам'ятати, що використовувані засоби захисту є ефективними ізоляторами у разі перебування в сухому стані,

вони захищають працівників оперативно-рятувальних підрозділів від уражень електричним струмом.

Натомість просочений водою одяг не забезпечує захисту, внаслідок чого за високих значень напруги та руху струму шляхом «рука – рука» через тіло людини можуть проходити смертельно небезпечні струми. Це відбувається у разі одночасного дотику до обох клем кіл постійного струму. У разі постійного дотримування безпечної відстані величиною принаймні один метр від установок під напругою цей сценарій неможливий, проте цілком можливий на практиці в умовах поганої видимості і задимленості.

Необхідно пам'ятати, що вологі засоби [15] захисту практично не забезпечують захисної ізоляції. У вологих підвалах електроустановки, які перебувають під напругою, такі як інвертори або електричні акумулятори (акумуляторні батареї), у разі несправності являють собою небезпеку!

Окрім ризику ураження електричним струмом, можуть утворюватися їдкі та вибухонебезпечні газоподібні речовини (газоподібні речовини, що утворюються під час електролізу). У такому разі рекомендовано застосовувати провітрювання приміщень.

Засоби, що використовуються пожежним підрозділом під час виконання операцій вночі, зазвичай можуть спричинити виникнення у фотогальванічних модулях постійного струму значних величин.

Штучне освітлення [10–11] здатне призводити до утворення небезпечних величин напруги і струму у фотогальванічній системі. У разі дотримування заданих значень мінімальної відстані до джерел освітлення та застосування тільки світлодіодних світильників безпеку від штучного освітлення потрібно вважати нехтувано низькою.

*Особливості ліквідації надзвичайних ситуацій та гасіння пожеж на об'єктах і спорудах із наявністю вітрових джерел електроенергії*

До особливостей, які потрібно враховувати під час проведення робіт з ліквідації надзвичайних ситуацій та

гасіння пожеж на об'єктах і спорудах із наявністю вітрових джерел електроенергії [11; 14–15], насамперед належать:

- автономність роботи вітрової електростанції (далі – ВЕС) у поєднанні з віддаленістю від пожежних станцій;

- великі розміри сучасних ВЕС (висота башт досягає 130 м, діаметр лопатів ротора до 120 м);

- відсутність на певний час засобів подавання вогнегасних речовин на таку висоту;

- великі розміри та маси лопатів роторів, що обертаються, створюють велику небезпеку для пожежників від падіння частин лопатів.



Рисунок 6 – Загальний вигляд вітрової електростанції (а); пожежі внаслідок механічних несправностей (б); пошкодження від пожежі внаслідок удару блискавки (в)

До основних пожежонебезпечних об'єктів ВЕС загалом належать:

- а) гондола з розташованими всередині редуктором, генератором, шафою перетворювача частоти та шафою управління, первинними трансформаторами і системами охолодження та мастила, системою гальмування, шафою контролю стану обладнання, кабельними лініями;

- б) опора трубного типу з розташованим усередині пристроєм середньої напруги, шафами управління, приводом ліфта і кабельними лініями;

- в) зовнішні трансформатори та електричні мережі.

Ризики отримати травми за звичайних умов мінімальні, але потужність вітру суттєво впливає на унікальні індустріальні ризики для персоналу, який працює у небезпечних умовах. До них належать: відокремлення лопатей від валу ротора, руйнування вітрової електроустановки (далі – ВЕУ), руйнування (колапс) вежі, перегрів і пожежа на елементах ВЕУ, небезпечні погодні умови, робота на суттєво великих висотах (близько 100 м для ВЕУ > 2МВт), користування машинним устаткуванням,

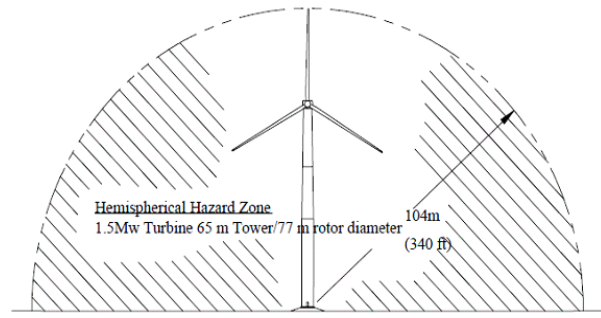
що обертається, підіймання і утримання важкого устаткування, користування високою електричною напругою, транспортний доступ, удари блискавки, експозиція до небезпечних розчинних хімічних речовин під час виробництва роторів, масляні проливи, нашарування криги тощо.

Пошкодження або відмова окремих елементів ВЕУ може відбутися, якщо достатньо сильний вітер чинить навантаження на будівлю / механізми ВЕУ.

Перед тим як розпочати виконання робіт особливу увагу потрібно приділити реальній максимальній швидкості вітру. На сьогоднішньому рівні метеорологічних знань передбачати максимальну швидкість вітру є здебільшого нереальним. Унаслідок екстремального вітру може статися руйнування вежі (колапс) ВЕУ, а зона, в межах якої є ризик для третьої сторони, в цьому разі визначається розмірами ВЕУ. Розрахунки також показують, що розкидання лопатей (уламків лопатей) для ВЕУ з роторами діаметром 70–80 м і максимальною швидкістю обертання 20–22 об/хв може складати відстань до 150 м.



а



б

Рисунок 7 – Руйнування лопатей ВЕУ під час штормового вітру

Кінцівки лопатей роторів (рис. 7 б) повинні витримувати швидкість вітру до 320 км/год. Розрахунки показують (рис. 8 в), що розкидання лопатей (уламків лопатей) для ВЕУ з роторами діаметром 70–80 м за максимальної швидкості обертання 20–22 об/хв становить відстань до 150 м.

В особливих метеоумовах можливе утворення криги на поверхні ротора ВЕУ. Крижані шматки можуть розлітатися навколо ВЕУ під час її роботи на досить великі відстані, становлячи загрозу не лише для людей. Результати оцінки ризику дають змогу ідентифікувати безпечну дистанцію величиною 200–250 м від будь-якої ВЕУ, поза якою істотного ризику для людини від крижаних фрагментів немає.

На практиці [14; 16] для регулювання ризику третьої сторони навколо потенційно небезпечних об'єктів встановлюється зона громадської безпеки (далі – ЗГБ), яка є аналогом санітарно-захисної зони, з межами уздовж контурів індивідуального ризику нормативних значень.

Основну частину робіт, пов'язаних із реагуванням на надзвичайну ситуацію або усуненням загрози її виникнення, виконують сили цивільного захисту підприємства, установи чи організації, де сталася така ситуація, з наданням їм необхідної допомоги силами цивільного захисту адміністративно-територіальної одиниці, на території якої розташоване таке підприємство, установа чи організація, а також відповідними формуваннями Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту. Додаткові сили цивільного захисту залучаються до

ліквідації наслідків надзвичайної ситуації за рішенням керівника робіт з ліквідації наслідків надзвичайної ситуації.

У разі залучення до ліквідації надзвичайної ситуації на ВЕС для забезпечення безпеки підрозділів ДСНС необхідно дотримуватися такої послідовності дій:

- оцінити можливість фізичного доступу до башти, враховуючи метеорологічні обставини та їх можливий розвиток;

- якщо пожежа охопила лопаті ротора, і вони обертаються, то не можна перебувати біля башти;

- якщо пожежа не охопила лопаті ротора, і вони обертаються з нормованою швидкістю, то необхідно виконати аварійне зупинення ротора. Цю процедуру може виконувати тільки представник сервісної служби, яка обслугує ВЕС;

- пам'ятати, що на сучасних вітрогенераторах зазвичай встановлені системи автоматичного пожежогасіння, важливо здійснювати контроль за їх роботою;

- у разі виникнення пожежі в гондолі підійматися пожежникам до місця пожежі не можна із-за загрози їх життю через зупинення під'ємних механізмів;

- у разі зупинення ротора під час виникнення пожежі в розподільних шафах необхідно вимкнути вимикачі, які з'єднують шахи з гондолою та зовнішньою електричною мережею. Цю процедуру може виконувати тільки представник сервісної служби, яка обслугує ВЕС. Після цього можна розпочати гасіння пожежі;

- здійснювати постійний контроль за розвитком подій (поведінка ротора, електричних мереж та електричних шаф).





Рисунок 8 – Руйнування вежі ВЕУ біля автобана внаслідок екстремального вітру

Особливості організації і гасіння пожеж на обладнанні ВЕС – дотримання правил безпеки праці та взаємодія з черговим персоналом, що визначені Статутом дій органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту під час гасіння пожеж, Інструкцією з гасіння пожеж на енергетичних об'єктах України, Правилами пожежної безпеки в компаніях, на підприємствах та в організаціях енергетичної галузі України тощо.

Порядок ліквідації пожежі на обладнанні ВЕС має багато спільного з ліквідацією пожеж на інших енергетичних об'єктах, це стосується особливостей гасіння пожеж:

- на електроустановках під напругою;
- у кабельних спорудах;
- у синхронних компенсаторах;
- у трансформаторах і маслонаповнених реакторах.

Для того щоб гасіння пожежі в гондолах на великій висоті було можливим рекомендовано до штатних автоматичних систем пожежогасіння встановлювати систему подавання компресійної піни сухотрубами в гондолу ВЕС з можливістю підключення установок генерування компресійної піни в нижній частині башти.

**Висновки та напрями подальших досліджень.** Під час проведення аналізу надзвичайних ситуацій, що виникли на об'єктах альтернативної енергетики в країнах Європи, та дослідження сучасного стану організації пожежогасіння таких об'єктів у країні з'ясовано, що чітких

вказівок щодо боротьби з пожежею на об'єктах альтернативної енергетики немає.

Нині в Україні також немає нормативної документації щодо зобов'язання власників об'єктів альтернативної енергетики розміщувати на видному місці основну інформацію про їх технологічні параметри, схеми розташування потенційно небезпечного обладнання, схеми підключення окремих установок, елементів та кабелів, що потребує внесення змін до чинних законодавчих актів. Зокрема, це стосується приватних господарств.

Наявність такої інформації має вирішальне значення для ухвалення рішення щодо способу подальшого пожежогасіння та використання засобів гасіння.

Успішне гасіння пожеж на об'єктах альтернативної енергетики залежить від заздалегідь проведеної підготовки особового складу підрозділів, які беруть участь у ліквідації надзвичайних ситуацій, що виникли на цих об'єктах, або залучатимуться до проведення робіт.

Аналіз світового досвіду в управлінні та організації гасіння пожеж об'єктів альтернативної енергетики доводить, що існують проблеми аналогічні українським. Водночас слід визнати, що модель організації управління та гасіння пожеж на цих об'єктах на національному рівні не відповідає сучасним вимогам щодо безпеки проведення робіт з ліквідації надзвичайних ситуацій та гасіння пожеж і потребує реформування.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Про затвердження Інструкції з гасіння пожеж на енергетичних об'єктах України : наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 22.12.2011 № 863. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0013-12#Text> (дата звернення : 20.03.2023).
2. Про затвердження Правил пожежної безпеки в компаніях, на підприємствах та в організаціях енергетичної галузі України : наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 26.09.2018 року № 491. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0328-19#Text> (дата звернення : 20.03.2023).
3. Про введення в дію Інструкції із складання Карток оперативно-тактичних дій на пожежах та їх вивчення в системі службової підготовки : окреме доручення Голови ДСНС від 04.10.2017 № В-155. URL : <https://dsns.gov.ua/uk/zakonodavstvo/departament-reaguvannya-na-padzvichayni-situaciyi-docs> (дата звернення : 20.03.2023).
4. Методичні рекомендації щодо порядку дій аварійно-рятувальних формувань ДСНС під час гасіння пожеж на сонячних електростанціях. URL : [https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/osvitnya\\_diyalnosti/slugbova\\_pidgotovka/navchalno\\_metoduchne\\_zabezpechennya/dodatkov\\_i\\_zanyattya/2.pdf](https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/osvitnya_diyalnosti/slugbova_pidgotovka/navchalno_metoduchne_zabezpechennya/dodatkov_i_zanyattya/2.pdf) (дата звернення : 20.03.2023).
5. Скоробагатко Т. М., Іллюченко П. О., Пруський А. В., Тищенко В. О. До питання безпечного гасіння пожеж на об'єктах з наявністю сонячних електростанцій. *Проектування безпечного середовища громад* : матеріали міжнар. наук.-практ. конф., 02 лип. 2021 р. Маріуполь, 2021. С. 372–376.
6. Скоробагатко Т. М. Борисов А. В., Іллюченко П. О., Пруський А. В., Дівізінюк М. М., Гудович О. Д., Питання безпечного гасіння пожеж на об'єктах з наявністю сонячних електростанцій. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2021. № 2(12). С. 82–91.
7. DIN VDE 0132 VDE 0132:2008-08. Firefighting and assistance in or near electrical installations. Class/Status : Standard, withdrawn. Released: 2008-086.
8. Гуральчик В., Титко Р. Фотоелектрики. Прилади, фотоелектричні та електричні установки. Краків : Видавництво та друкарня Словацького товариства в Польщі, 2016.
9. Кушнір М., Капало П., Враней Ф. Фотоелектрики у світі. Кошице : Технічний університет Кошице, 2014.
10. Oxford PV, the Perovskite Company, Perovskite PV to transform the global solar market, URL : <https://www.oxfordpv.com> (дата звернення : 20.03.2023).
11. Стандарт VDE 0132: 2008 (Німеччина) «Боротьба з пожежами в електроустановках або поблизу них». URL : <https://www.dw.com/ru/solnechnaja-jenergetika-v-germanii-vse-bolshe-solnca-panelej-i-deneg/a-62254025> (дата звернення : 20.03.2023).
12. Німецька страхова асоціація (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. - GDV) 27.10.2022. Видавництво : VdS Schadenverhütung GmbH • Amsterdamer Str. 174 • 50735 Кельн, Німеччина
13. Assessing Fire Risks in Photovoltaic Systems and Deloping Safety Concepts for Risk Minimization // Berner Fachhochschule Technik und Informatik, Berufsfeuerwehr München, Currenta GmbH & Co. OHG und andere // Інф.с сайта PV Fire Safety Fire Guideline - Translation - V04 20180614 - FINAL PDF
14. Звіт з оцінки впливу на довкілля від планованої діяльності. Проект будівництва вітрової електростанції потужністю 65 Мвт. URL : <http://www.caithnesswindfarms.co.uk/AccidentStatistics>. (дата звернення : 25.03.2023).
15. S. Starr Turbine Fire Protection URL : <http://windssystemsmag.com/article/detail/136/turbine-fire-protection>. (дата звернення : 20.03.2023).
16. ДСТУ ІЕС 61400-1-2001 Системи турбогенераторні вітряні. Ч. 1. Вимоги безпеки (ІЕС 61400-1:1999, IDT)

**REFERENCES**

1. Pro zatverdzhennya Instrukcii z gasinnya pozhezh na energetichnih ob'ektah Ukraini : Nakaz M-va energetiki ta vugil. prom-sti Ukraini vid 22.12.2011 r. № 863. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0013-12#Text>
2. Pro zatverdzhennya Pravil pozhezhnoi bezpeki v kompaniyah, na pidpriemstvah ta v organizaciyah energetichnoi galuzi Ukraini : Nakaz M-va energetiki ta vugil. prom-sti Ukraini vid 26.09.2018 r. № 491 : stanom na 20 sich. 2023 r. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0328-19#Text>
3. Instrukciya zi skladannya kartok operativno-taktichnih dij na pozhezah ta ih vivchennya v sistemі sluzhbovoi pidgotovki : vid 04.10.2017 r. № V-155.
4. Metodichni rekomendacii shchodo poryadku dij avarijno-ryatuvальnih formuvan' DSNS pid chas gasinnya pozhezh na sonyachnih elektrostanciyah Retrieved from : [https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/osvitnya\\_diyalnosti/slugbova\\_pidgotovka/navchalno\\_metoduchne\\_zabezpechennya/dodatkov\\_i\\_zanyattya/2.pdf](https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/osvitnya_diyalnosti/slugbova_pidgotovka/navchalno_metoduchne_zabezpechennya/dodatkov_i_zanyattya/2.pdf)
5. Do pitannya bezpechnogo gasinnya pozhezh na ob'ektah z nayavnistyuy sonyachnih elektrostancijyu. roektuvannya bezpekovogo seredovishcha громад : materialі mizhnar. nauk.-prakt. konf. m. Mariupol', 2 lip. 2021 r. 2021. S. 372–376.
6. Pitannya bezpechnogo gasinnya pozhezh na ob'ektah z nayavnistyuy sonyachnih elektrostancij / T. SKOROBAGAT'KO ta in. *Naukovij visnik: Civil'nij zahist ta pozhezha bezpeka*. 2021. № 2(12). S. 82–91. URL: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.2\(12\).82-91](https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.2(12).82-91)
7. Firefighting and assistance in or near electrical installations. Class/Status: Standard, withdrawn. Released : no. DIN VDE 0132 VDE 0132:2008-08.
8. V. Gural'chik, R. Titko / Fotoelektriki. Priladi, fotoelektrichni ta elektrichni ustanovki. Vidavnictvo ta drukarnya Slovac'kogo tovaristva v Pol'shchi. 2016. Krakiv
9. M. Kushnir. Fotoelektriki u sviti / M. Kushnir P. Kapalo, F. Vraney // *Tekhnichnij universitet Koshice, Koshice*, 2014.
10. Oxford PV, the Perovskite Company, Perovskite PV to transform the global solar market // <https://www.oxfordpv.com/>
11. "Fighting fires in or near electrical installations" Standard VDE 0132: 2008 (Germany). // <https://www.dw.com/ru/solnechnaja-jenergetika-v-germanii-vse-bolshe-solnca-panelej-i-deneg/a-62254025>
12. German Insurance Association (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. - GDV) 10/27/2022. Publisher: VdS Schadenverhütung GmbH • Amsterdamer Str. 174 • 50735 Cologne, Germany
13. Assessing Fire Risks in Photovoltaic Systems and Deloping Safety Concepts for Risk Minimization // Berner Fachhochschule Technik und Informatik, Berufsfeuerwehr München, Currenta GmbH & Co. OHG und andere // Інф.с сайта PV Fire Safety Fire Guideline - Translation - V04 20180614 - FINAL PDF

14. Report on the assessment of the impact on the environment from the planned activity. The project for the construction of a wind power plant with a capacity of 65 MW. <http://www.caithnesswindfarms.co.uk/AccidentStatistics.htm> 301
15. S.Starr Turbine Fire Protection // <http://windssystemsmag.com/article/detail/136/turbine-fire-protection>
16. Wind turbine generator systems. Part 1. Safety requirements : DSTU IES 61400-1-2001 (IEC 61400-1:1999, IDT), 2001

## FEATURES OF FIRE EXTINGUISHING AT OBJECTS AND BUILDINGS USING ALTERNATIVE ENERGY SOURCES

**A. Kodryk, A. Borysov, O. Titenko, P. Illiuchenko**

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

---

**KEYWORDS:** ANNOTATION

occupational safety, energy facility, regulatory support, fire extinguishing, solar power plant.

The Law of Ukraine «On Alternative Energy Sources» defines the types of alternative energy sources, but the most relevant for Ukraine is the use of solar and wind energy. In the work, an analysis of the world experience in the management and organization of extinguishing fires in electrical installations under voltage was carried out, the peculiarities of extinguishing fires at facilities with the presence of solar and wind power plants were considered. The domestic and foreign works of scientists in this direction were analyzed. Most of the publications about their fire hazards concern wind and solar plants, while other alternative energy facilities receive little attention. Normative documents on the construction of alternative energy facilities, their operation, and other regulatory documents on the organization of extinguishing these facilities and ensuring safe working conditions of operational and rescue units were analyzed. Alternative energy facilities have common components (electricity conversion equipment) with traditional energy generating facilities. These common constituent parts are generally known and used in various sectors of the economy, and there are firefighting instructions for them [1–3] and can be used in extinguishing fires of solar and wind energy facilities. Features that distinguish firefighting at facilities with alternative energy from others and the main causes of accidents are determined. First of all, it is the presence of direct current in the system, which is produced even when it is disconnected in the distribution devices, overheating of cable networks and the possibility of a short circuit. Regarding the features of wind power plants, their size, location away from populated areas, and meteorological conditions are added.



УДК 614.841.3

## МОДЕЛЬ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ У МІСЦЯХ КОНТАКТНИХ З'ЄДНАНЬ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1.141-148>

Зобенко О. ORCID iD 0000-0001-9641-2779

\*E-mail: zobenko\_oleksandr@chipb.org.in

*Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля, Україна*

### ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

*Надійшла до редакції:*

11.04.2023

*Пройшла рецензування:*

02.05.2023

### КЛЮЧОВІ СЛОВА:

модель, протипожежний захист, електричні мережі, надмірний нагрів у місцях з'єднання, споживчі потужності, перегрівання, пожежі.

### АНОТАЦІЯ

Вказана модель елемента протипожежного захисту належить до галузі електротехніки, а саме – пристроїв комутації в електричних мережах з автоматичним вимиканням, що безпосередньо реагують на перевищення номінальної температури. Проаналізовано статистичні дані про пожежі в електричних мережах, їх причини та досліджено сучасний стан розвитку технічних рішень щодо попередження надмірного локального нагрівання у місцях контактних з'єднань. Проведено аналіз причин виникнення надмірного нагрівання в місцях з'єднання контактів. Досліджено поле формування моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях контактних з'єднань. Запропонована модель елемента протипожежного захисту електричних мереж у місцях надмірних споживчих потужностей дає змогу врахувати та попередити аварійну ситуацію внаслідок перегрівання електричних мереж у місцях контактних з'єднань. Для забезпечення гарантованого спрацювання елемента протипожежного захисту рекомендована також перевірка працездатності елемента протипожежного захисту, який приєднується до електричної мережі. Запропоновано підхід щодо протипожежного захисту електричних мереж у місцях надмірних споживчих потужностей та розроблено елементи на базі розеткового модуля з функцією розмикання електричного кола за умови перегрівання з'єднання штепсель – розетка з наявністю індикації працездатності чи спрацювання теплового запобіжника. На основі отриманих результатів розроблено модель протипожежного захисту електричних мереж у місцях контактних з'єднань під час надмірного локального нагрівання. Зміна режиму роботи світлового індикатора дасть можливість користувачу зробити висновок про спрацювання теплового запобіжника, що вказуватиме на необхідність проведення відповідних кваліфікованих робіт із заміни або відновлення розетки та штепселя приладу. Поставлено завдання щодо подальших досліджень у визначеному напрямі.

**Постановка проблеми.** Згідно зі статистикою пожеж в Україні маємо стійку тенденцію до збереження кількості пожеж від джерел запалення електричного походження. Основними напрямками забезпечення пожежної безпеки є усунення умов виникнення пожежі та мінімізація її наслідків [1]. Понад 14% пожеж виникає внаслідок порушень роботи електричних мереж, але виникнення аварійних ситуацій через великі значення перехідного опору є одним із найскладніших питань.

Для захисту обладнання від коротких замикань та перевантажень електричні мережі обладнуються апаратами захисту: запобіжники, автоматичні вимикачі, теплові реле тощо. Водночас особливої уваги потребують місця з'єднання, такі як електричні розетки, адже у їх конструкції налічується понад шість з'єднань, порушення яких впливає на підвищення величини перехідних опорів.

Частота (циклічність) використання розеток із кожним роком підвищується. Це пов'язано із наявністю різних побутових

приладів та гаджетів (ноутбуків, мобільних телефонів, планшетів), які потребують щоденної підзарядки. Внаслідок інтенсифікації використання апаратів з'єднання зношуються контактні поверхні, що супроводжується підвищенням їх нагріву. Виявити це зовнішнім оглядом дуже складно, його помічають тоді, коли відбувається плавлення пластикових елементів місць з'єднання або ж їх самозаймання. З огляду на це розроблення математичної моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях з'єднання під час надмірного локального нагрівання є актуальним.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Розробленню моделей протипожежного захисту електричних мереж присвячені роботи багатьох вчених. М. Бурик та Д. Коломійчук розробили імітаційну модель однорідної симетричної ланцюгової схеми [2]. І. Курило дослідив електричні кола з розподіленими параметрами [3].

Наукові праці К. Маренича присвячені математичному моделюванню короткого замикання [4]. У роботі запропоновано використання методів математичного моделювання, досліджено стан промислового електротехнічного комплексу в разі виникнення двофазного короткого замикання на виході тиристорного регулятора напруги. В роботах В. Сивокобиленко та С. Васильця розроблено математичну модель дільничного шахтного електротехнічного комплексу, що містить приєднання з короткозамкненим асинхронним двигуном, та досліджено перехідні процеси під час виникнення міжфазних (три- і двофазних) коротких замикань в кабелі живлення, зумовлені дією зворотної електрорушійної сили обертання двигуна споживача [5].

У наукових працях [6] розглянуто питання, пов'язані з функціями електричних апаратів, та їх частин, тенденціями ринку, класифікацією, захисними властивостями та захищеністю електричних апаратів, вимогами до них, нормальними та ненормальними умовами їх роботи, а також з їх позначенням та маркуванням згідно з вимогами міжнародних стандартів. Розглянуто

сучасні електромеханічні апарати й комплектні пристрої низької, середньої та високої напруги, а також суміжне обладнання щодо їх призначення, будови, принципів дії, основних характеристик та особливостей застосування.

Відомо із [7], що відбуваються електромагнітні та електромеханічні перехідні процеси в системах електропостачання підприємств. Викладено фізичні явища, що зумовлені перехідними процесами з урахуванням різних факторів, методи аналізу і розрахунку процесів.

У роботі [8] зазначається про розроблення протипожежного захисту розеткового модуля електричної мережі, що слугуватиме основою для створення електричних штепсельних з'єднань із системою захисту від теплового перегрівання.

З огляду на дослідження та публікації можна зробити висновок, що питання розроблення моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях з'єднання під час надмірного локального нагрівання не знаходило відображення у наукових джерелах.

### **Формулювання цілей дослідження.**

Метою дослідження є розроблення моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях з'єднання контактів під час надмірного локального нагрівання внаслідок великих перехідних опорів.

Отже, основними цілями дослідження є:

- аналіз причин виникнення надмірного нагрівання в місцях з'єднання контактів;

- визначення основних підходів до розроблення моделі елемента протипожежного захисту електричних мереж у місцях з'єднань контактів;

- опис моделі елемента протипожежного захисту електричних мереж у місцях з'єднань контактів.

**Методи дослідження.** Для вирішення зазначеної проблеми було використано аналітичний та емпіричний методи дослідження.

-

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Причиною аварійних ситуацій в електроустановках і, як наслідок, пожежі можуть слугувати перехідні опори, що трапляються в місцях з'єднання проводів, кабелів, шин, приладів керування і захисту, в ковзних контактах електричних машин тощо. Пошкодження струмопровідних частин та пожежі від великих перехідних опорів виникають не рідше, чим від перевантажень. На виробництві вони бувають частіше, ніж у побуті через велику кількість контактних з'єднань.

Перехідним опором називається опір в місцях переходу струму із одного контакту на другий через площину (точки) їх стикання. У разі поганого контакту перехідний опір може досягати значних величин. Із формули  $R = \rho \frac{l}{S}$  у разі  $S \rightarrow 0$ ,  $R \rightarrow \infty$  за законом Джоуля-Ленца (за незмінної величини струму),

$$Q = I^2 R t \quad \text{також} \rightarrow \infty. \quad (1),$$

де  $Q$  – кількість теплоти, що виділяється в провіднику,

$I^2$  – сила струму;  
 $R$  – опір провідника;  
 $t$  – час.

Зазвичай на практиці великі перехідні опори виникають в місцях:

- з'єднання провідників із різномірних матеріалів мідь – алюміній, алюміній – залізо, з часом алюміній здатний втрачати пружність і виникає послаблення контакту, його нагрівання, окислювання й утворення великого перехідного опору;

- холодних, недбало виконаних скруток жил проводів у мережах, розгалужувальних коробках та інших з'єднаннях, виконаних тимчасово, а потім залишених надовго;

- ковзних з'єднань в апаратах і приладах: робочих контактах магнітних контакторів, пускачів, контролерів, теплових реле, плавких запобіжників, штепсельних розеток, патронів тощо;

- впливу хімічно-активного навколишнього середовища (пара, волога, кислоти, луги, підвищена температура).

Крім цього, відбувається природне псування контактвальних поверхонь через окислювання металів (корозію), з часом з'являється втома металів у з'єднаннях, яка призводить до послаблення сили взаємного притискання контактів.

Ось чому повинні чітко виконуватися попереджувально-планові ремонти та огляди електрообладнання, під час яких проводять дрібний і поточний ремонт апаратів захисту і керування та підтягування контактів у з'єднаннях.

Таким чином, для запобігання нагріванню від великих перехідних опорів та запобігання пожежі особливу увагу слід приділяти з'єднанню струмопровідних частин між собою, а також підключенню їх до клем машин і апаратів.

Існує декілька способів з'єднання проводів: зварювання, паяння і механічне з'єднання. Для зручності та покращення контакту використовують затискачі й наконечники.

*Зварювання* – найбільш надійний спосіб з'єднання, який забезпечує хороший (цілісний) контакт, особливе значення цей спосіб має для вологих і особливо вологих приміщень. Незручність цього способу полягає в тому, що його неможливо використовувати у пожежо- та вибухонебезпечних зонах, під час роботи агрегатів.

*Паяння* також забезпечує досить надійний контакт, але водночас потрібне додаткове джерело теплоти (наприклад, газова запальничка) для плавлення припою.

Треба розуміти, що під час зварювання та паяння ізольованих проводів необхідно вжити заходів застереження, що унеможливають займання та пошкодження ізоляції.

Нині найбільш поширений *механічний спосіб з'єднання* проводів опресуванням за допомогою кліщів або гідропреса. Цей спосіб дає змогу виконувати роботи за наявності вибухонебезпечного середовища і не потребує джерела теплової енергії, але забезпечує досить хороший електричний контакт.

У розподільних та інших пристроях, де використовуються струмопроводи значних перерізів – шини, щільність їх

з'єднання забезпечується гвинтовим способом (гвинт – шайба – гайка). Гвинтові з'єднання гарантують надійний контакт під час з'єднання конструктивних струмопровідних елементів мідь – мідь, або алюміній – алюміній.

З'єднання мідь – алюміній не є бажаним через різницю в їх міцності, алюміній менш тривкий і з часом контактне з'єднання погіршується, що призводить до утворення значних перехідних опорів і нагрівання контактувальних поверхонь. Через це такі з'єднання потребують додаткового використання шайб типу «гравер» та більш досконалого і постійного нагляду та контролю.

Насамкінець відзначимо, що запобігання короткому замиканню, перевантаженням та великим перехідним опорам забезпечуються правильним проектуванням, якісним монтажем і особливо технічно грамотною експлуатацією електроустановок.

Основними технічними засобами запобігання аварійним режимам є захист електричних мереж і електроустановок плавкими запобіжниками, автоматичними вимикачами та іншими апаратами.

Одночасно відзначимо, що апарати захисту не можуть створити умови запобігання проявам короткого замикання чи перевантаженням, ці пристрої призначені тільки для своєчасного вимикання аварійної ділянки електричного кола.

Визначення основних підходів до розроблення моделі елементу протипожежного захисту електричних мереж у місцях з'єднань контактів. Модель елементу захисту належить до галузі електротехніки, а саме – пристроїв з'єднання в електричних мережах з автоматичним вимиканням, що безпосередньо реагують на перевищення номінальної температури.

Місця з'єднання в електричних мережах можуть надмірно нагріватися і внаслідок цього ставати джерелом запалення під час пожеж. Причиною нагрівання є підвищення опору в місці контакту або перевищення допустимого струмового навантаження. Нагрівання внаслідок підвищення перехідного опору

призводить до локального нагрівання елементів електричної мережі та може не супроводжуватися спрацюванням апаратів захисту електричних мереж (автоматичні вимикачі, струмові запобіжники).

Відома модель елементу протипожежного захисту з логічним ланцюгом управління призначена для постійного контролю однієї або всіх розроблених функцій, таких як відстеження правильної і повної вставки штекера, наявності навантаження, поточного навантаження на розетку і вимірювання температури на виході. Основними елементами моделі з логічним ланцюгом управління є перемикач з електричним керуванням, інтелектуальна схема керування, блок живлення, щонайменше один датчик визначення повного і правильного встановлення електричної вилки. Модель може містити датчик наявності навантаження, датчик поточного навантаження та датчик температури на виході з розетки. Інтелектуальна схема містить мікропроцесор, який обробляє дані з датчиків та здійснює керування роботою перемикача. Датчик температури є термістором, що змінює опір у разі зміни температури. Вимикання перемикача здійснюється мікропроцесором під час досягнення термістором певного еталонного значення опору.

Інший фізичний прототип базується на процесі захисту від перегріву електричної з'єднувальної розетки під час з'єднання, наприклад електромобіля з електричною мережею, що від'єднує розетку від електричної мережі у разі перегріву розетки. Запропонований спосіб передбачає чотири етапи: вимірювання температури розетки, передання отриманої інформації на спеціальний електричний пристрій, визначення електричним пристроєм стану перегріву через порівняння з еталонним значенням та зниження значення електричного струму або від'єднання розетки від електричної мережі.

Найбільш близьким фізичним аналогом є електрична розетка з тепловим захистом. Електрична розетка з тепловим захистом складається із супорту кріплення до монтажної коробки, теплового

запобіжника, який розміщено на основі розетки, гвинтових затискачів для дротів, розпірного механізму, гніздового контакту, теплопровідного наповнювача та струмопровідних дротів. Спрацювання теплового запобіжника відбуватиметься за умови нагрівання до певної граничної температури за рахунок тепла, що виділятиметься від гніздового контакту.

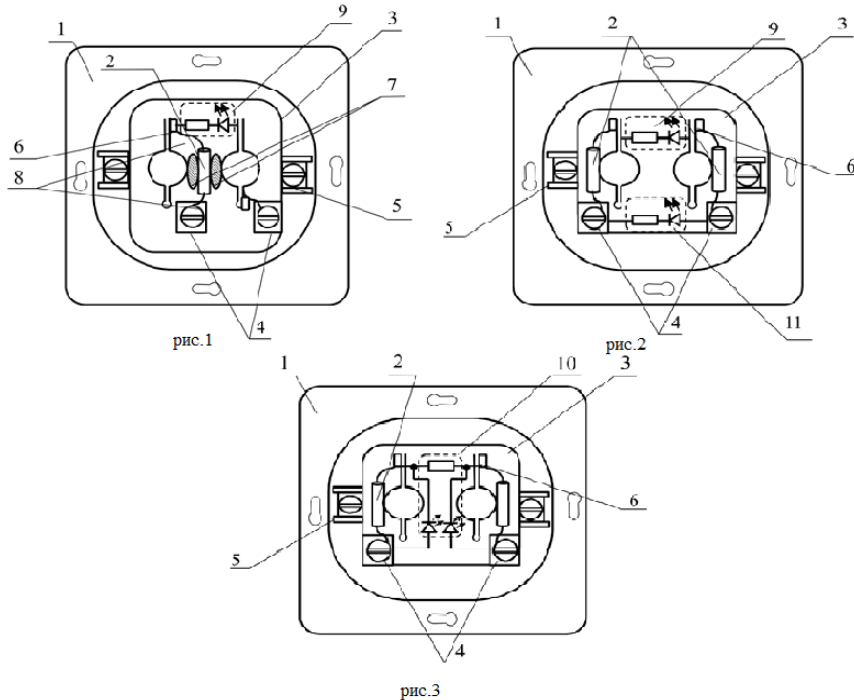
Таким чином, запропонований підхід формування моделі елемента протипожежного захисту електричних мереж в місцях з'єднань контактів дає змогу врахувати та згодом попередити аварійну ситуацію внаслідок перегрівання електричних мереж у місцях надмірних споживчих потужностей. Також з метою однозначного спрацювання елемента протипожежного захисту пропонується перевірка працездатності пристрою, що приєднують до електричної мережі та самої мережі.

*Опис моделі елемента протипожежного захисту електричних мереж у місцях з'єднань контактів*

В основу моделі елемента протипожежного захисту електричних мереж у місцях з'єднань контактів покладено припущення створити елемент на базі розеткового модуля з функцією розмикання електричного кола за умови перегрівання з'єднання штепсель – розетка з наявністю індикації працездатності чи спрацювання теплового запобіжника.

Поставлена задача розв'язується за допомогою використання світлових індикаторів, що змінюватимуть свій стан після спрацювання теплового запобіжника, який дотикається до струмопровідних пластин розетки.

Варіанти виконання різних допустимих реалізацій схем електричної розетки з тепловим захистом та світловими індикаторами наведено на рис. (1–3). Креслення, опис виконання та використання електричної розетки з тепловим захистом і світловими індикаторами стану не обмежують заявленої моделі.



*Рисунки (1–3) Варіанти виконання різних допустимих реалізацій схем електричної розетки з тепловим захистом та світловими індикаторами*

*Джерело: розроблено та узагальнено автором*

Модель елемента протипожежного захисту електричних мереж у місцях з'єднань контактів із тепловим захистом та світловими індикаторами складається із супорту кріплення до монтажної коробки 1, теплового запобіжника 2, який розміщено на основі розетки 3, гвинтових затискачів для дротів 4, розпірного механізму 5, гніздового контакту 6, теплопровідного наповнювача 7, струмопровідних дротів 8, світлового індикатора працездатності теплового запобіжника 9, світлового індикатора спрацювання теплового запобіжника 10 та світлового індикатора наявності електричного струму в мережі 11.

Елемент протипожежного захисту електричних мереж у місцях надмірних споживчих потужностей з тепловим захистом та світловим індикатором працює таким чином. Теплові запобіжники 2 дротами 8 з'єднують із затискачами дротів 4 з одного боку та гніздового контакту 6 з іншого та розміщують таким чином, щоб він безпосередньо або через теплопровідний наповнювач 7 дотикався до гніздового контакту 6. Світловий індикатор працездатності теплового запобіжника 9 приєднують до гніздових контактів 6. Світловий індикатор спрацювання теплового запобіжника 10 приєднують до гніздових контактів 6 та затискачів дротів 4. Світловий індикатор наявності електричного струму в мережі 11 та струмопровідні дроти електричної мережі приєднують до затискачів дротів 4. За допомогою супорту кріплення 1 та/або розпірного механізму 5 фіксують у монтажній коробці.

Під час нормального режиму роботи елемента протипожежного захисту електричних мереж у місцях надмірних споживчих потужностей з тепловим захистом виникає електричне коло, що включає електричний дріт мережі живлення, затискачі 4, теплові запобіжники 2, дроти 8, гніздові контакти 6, світловий індикатор працездатності теплового запобіжника 9, світловий індикатор спрацювання теплового запобіжника 10 та світловий індикатор наявності електричного струму в мережі 11. Після спрацювання теплового запобіжника 2 за рахунок тепла, що

виділятиметься від гніздового контакту 6, електричне коло розмикається. У разі використання конструкції згідно з рис. 1 припиняється робота світлового індикатора працездатності теплового запобіжника 9. У разі використання конструкції елемента за рис. 2 припиняється робота світлового індикатора працездатності теплового запобіжника 9 та триває робота світлового індикатора наявності електричного струму в мережі 11. У разі використання схеми за рис. 3 робота світлового індикатора спрацювання теплового запобіжника 10 розпочинається після спрацювання теплового запобіжника 2.

Зміна режиму роботи світлового індикатора дасть змогу користувачу зробити висновок про спрацювання теплового запобіжника, що вказуватиме на необхідність проведення відповідних кваліфікованих робіт із заміни або відновлення розетки та штепселя приладу.

Таким чином, модель елемента протипожежного захисту електричних мереж у місцях з'єднань контактів спирається на процес розмикання електричного кола за умови перегрівання з'єднання в місцях надмірних споживчих потужностей за умови постійної візуалізації світової індикації працездатності чи спрацювання теплового запобіжника елемента протипожежного захисту.

**Висновки та напрями подальших досліджень.** З огляду на те, що апарати захисту не можуть створювати умови запобігання проявам короткого замикання чи перевантажень, ці пристрої призначені тільки для своєчасного вимикання аварійної ділянки електричного кола. З'ясовано необхідність додаткового протипожежного захисту електричних мереж у місцях з'єднань контактів за допомогою встановлення теплового запобіжника та світлового індикатора його спрацювання.

Розроблено модель елемента протипожежного захисту електричних мереж у місцях з'єднань контактів, яка дає змогу попередити аварійну ситуацію внаслідок перегрівання електричних мереж у місцях контактних з'єднань. В основу моделі елемента протипожежного захисту електричних мереж у місцях контактних

з'єднань покладено процес розмикання електричного кола за умови перегрівання з'єднань в місцях контактних з'єднань за умови постійної візуалізації світової індикації працездатності чи спрацювання теплового запобіжника елементу протипожежного захисту. Запропоновано здійснювати контроль спрацювання елементу протипожежного захисту за допомогою світлового індикатора.

Перспективи подальших досліджень у цьому напрямі полягають в перевірці достовірності розробленої моделі через

проведення експериментальних досліджень за попередньо розробленою програмою та методикою і встановленні залежності зміни нагріву контактних з'єднань електричних мереж від величин сили струму та напруги за різних умов контактних з'єднань, зокрема у разі окислення штепселя та справної розетки, справного штепселя та розігнутих контактів розетки, справного штепселя та справної розетки, окисленого штепселя та розігнутих контактів розетки.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту : вебсайт. URL : <https://idundcz.dsns.gov.ua/uk: https://idundcz.dsns.gov.ua/upload/5/3/8/5/7/5/2021-ctatuctuka-analitychna-dovidka-pro-pojeji-122021.pdf> (2021) (дата звернення : 12.04.2023).
2. Бурик М. П., Коломійчук Д. С. Імітаційна модель однорідної симетричної ланцюгової схеми. *Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики*. 2020. С. 446–462.
3. Електричні кола з розподіленими параметрами : навч. посіб. / І. А. Курило, І. Н. Намацалю В. І. Шеховцов. *НМК ВО*. С. 1993.
4. Маренич К. М., Ковальова І. В. Математичне моделювання короткого замикання в живлячому кабелі електротехнічного комплексу дільниці шахти. *Наук. пр. Донецького національного технічного університету. Сер. гірн.-електромех.* Вип. № 21. 2011. С. 126–136.
5. Сивокобиленко В. Ф., Василець С. В. Математичне моделювання перехідних процесів у електромережі дільниці шахти у разі витoku струму на землю. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. Вип. № 5. 2012. С. 76–83.
6. Клименко Б. В. Електричні апарати : Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс : навч. посіб. Харків : Точка, 2012. 340 с.
7. Перехідні процеси в системах електропостачання : підручник для ВНЗ міністерство освіти і науки України / І. В. Жежеленко, Ю. А. Папаїка, Л. І. Несен, за ред. Г. Г. Півняка. Дніпро : Нац. гірн. ун-т. Вид. 5-ге. 2016. С. 600.
8. Розроблення розеточного модуля електричної мережі. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація: збірник наукових праць Черкаси ЧНПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України* / О. М. Землянський, О. М. Мирошник, Д. В. Лесечко, О. О. Зобенко. Т. 4. № 20. 2020. С. 20–28.

### REFERENCES

1. Instytut derzhavnoho upravlinnia ta naukovykh doslidzhen z tsyvilnoho zakhystu [Institute of Public Administration and Scientific Research on Civil Protection]. (2021). Retrieved from : <https://idundcz.dsns.gov.ua/upload/5/3/8/5/7/5/2021-ctatuctuka-analitychna-dovidka-pro-pojeji-122021.pdf> [in Ukrainian].
2. Buryk, M. P., Kolomyichuk, D. S. (2020). Imitatsiina model odnorodnoi symetrychnoi lantsiuhovoi skhemy [Simulation model of a homogeneous symmetric circuit]. *Mizhnarodnyi naukovo-tekhnichnyi zhurnal Suchasni problemy elektroenerhotekhniki ta avtomatyky*, 446-462. [in Ukrainian].
3. Kurylo, I. A., Namatsalyuk, I. N., Shekhovtsov, V.I. (1993). *Elektrychni kola z rozpodilenyimi parametramy* [Electric circuits with distributed parameters]. *Navchalnyi posibnyk – NMK VO*, 96. [in Ukrainian].
4. Marenich, K. M., Kovaleva, I. V. (2011) Matematychnе modeliuвання korotkoho zamykannia v zhyvliachomu kabeli elektrotekhnichnoho kompleksu dilnytsi shakhty [Mathematical modeling of a short circuit in the power cable of the electrical complex of the mine site]. *Nauk. pr. Donetskoho natsionalno tekhnichnoho universytetu Ser. hirn.-elektromekh*, 126-136. [in Ukrainian].
5. Syvokobylenko, V. F., Vasylets, S. V. (2012). Matematychnе modeliuвання perekhidnykh protsesiv u elektromerezhi dilnytsi shakhty u razi vytoku strumu na zemliu [Mathematical modeling of transient processes in the power grid of the mine site in case of current leakage to the ground]. *Elektrotekhnichni ta kompiuternisystemy. №. 5*, 76-83. [in Ukrainian].
6. Klymenko, B.V. (2012). Elektrychni aparaty: Elektromekhanichna aparatura komutatsii, keruvannia ta zakhystu [Electrical apparatus: Electromechanical switching, control and protection equipment]. *Zahalnyi kurs - navchalnyi posibnyk. Kharkiv. Vydavnytstvo «Tochka»*, 340. [in Ukrainian].
7. Pivnyak, H.G., Zhezhelenko, I.V., Papayka, Y.A., Nesen, L.I. (2016). *Perekhidni protsesy v systemakh elektropostachannia* [Transient processes in power supply systems: a textbook for universities, edited by H.G. Rooster]. *Pidruchnyk dlia VNZ ministerstvo osvity i nauky Ukrainy, Nats. hirn. un-t: 5-te vydavnytstvo Dnipro*. 600. [in Ukrainian].
8. Zemlyanskiy, O. M., Myroshnyk, O. M., Lesechko, D. V., Zobenko, O. O. (2020). Rozroblennia rozetochnoho modulua elektrychnoi merezhi [Development of an electrical network outlet module]. *Nadzvychaini sytuatsii: poperedzhennia ta likvidatsiia, zbirnyk naukovykh prats Cherkasy ChIPB im. Heroiv Chornobyliya NUTsZ Ukrainy, Tom 4, №20*. 28. [in Ukrainian].

## MODEL OF FIRE PROTECTION OF ELECTRICAL NETWORKS AT THE PLACES OF CONTACT CONNECTIONS

Zobenko O.

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

---

### KEYWORDS: ANNOTATION

mathematical  
model, fire  
protection,  
electrical  
networks,  
excessive heating  
in switching  
places, local  
heating, consumer  
capacities.

This model of the fire protection element belongs to the field of electrical engineering, namely switching devices in electrical networks with automatic shutdown, which directly react to exceeding the nominal temperature. We have researched the field of forming a model of fire protection of electrical networks. The proposed approach of forming a model of an element of fire protection of electrical networks in places of excessive consumer capacities, which allows to take into account and subsequently prevent an emergency situation due to overheating of electrical networks in places of excessive consumer capacities. Also, in order to ensure the unequivocal operation of the fire protection element, it is suggested to check the functionality of the device connected to the electrical network and the network itself. After conducting a number of experiments, the problems of fire protection of electrical networks in places of excessive consumer power were substantiated and solved, and elements were developed based on the socket module with the function of opening the electrical circuit in the event of overheating of the plug-socket connection with the presence of an indication of operability or tripping of the thermal fuse. On the basis of the results obtained, a model of fire protection of electric networks in connection points during excessive local heating was developed, as well as a change in the operating mode of the light indicator, which will allow the user to conclude that the thermal fuse has tripped, which will indicate the need for appropriate qualified replacement or restoration work sockets and plugs of the appliance.



УДК 614.841

## ОСОБЛИВОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЕФЕКТИВНОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ ЗАХИСНИХ СПОРУД ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ В УМОВАХ БОЙОВИХ ДІЙ

<https://doi.org/10.33269/nvz.2023.1.149-157>

Поздєєв С. В.<sup>1</sup>, ORCID iD 0000-0002-9085-0513  
Ніжник В. В.<sup>2</sup>, ORCID iD 0000-0003-3370-9027  
Некора В. С.<sup>2</sup> ORCID iD 0000-0003-4354-4422  
Михайлов В. М.<sup>2</sup> ORCID iD 0000-0002-5629-1500  
Луценко Ю. В.<sup>2</sup> ORCID iD 0000-0002-9944-6760  
E-mail: valerianekora@gmail.com

<sup>1</sup>Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету служби цивільного захисту України, Україна

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

### ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 01.04.2023

Пройшла рецензування:  
29.04.2023

### КЛЮЧОВІ СЛОВА:

захисні споруди цивільного захисту, критерії, які зумовлюють захисні властивості, методи оцінювання властивостей захисних споруд, апробація, конструктивні параметри, бойовий засіб ураження.

### АНОТАЦІЯ

Показано недоліки підходу щодо формування захисних властивостей захисних споруд цивільного захисту та критеріїв, які їх зумовлюють. Проаналізовано статистичні дані щодо функціонування таких споруд в Україні та стан захищеності населення на одну тисячу осіб. Надано статистику щодо пошкоджень будівель та споруд на території нашої країни внаслідок бойових дій. Крім того, наведено дані, які характеризують рівень таких пошкоджень, а також щодо соціальних втрат населення, яке перебувало у будівлях та спорудах, що зазнали пошкоджень під час війни. Проаналізовано поведінку огорожувальних будівельних конструкцій захисних споруд та укриттів в умовах впливів вибухів і механічних імпульсних дій бойових засобів, спричинених повітряними та артилерійськими обстрілами. Окреслено залежність середніх значень соціальних втрат населення від кількості прямих влучань снарядів у будівлі та споруди. Проведено аналіз нормованих в Україні критеріїв, які визначають захисні властивості захисних споруд цивільного захисту. Запропоновано удосконалений перелік таких критеріїв та методик щодо їх визначення залежно від конструктивних параметрів захисних споруд цивільного захисту. Результати роботи стануть передумовою для подальших досліджень щодо обґрунтування конструктивних параметрів приміщень безпеки житлових і громадських будівель в умовах воєнного стану та використовуватимуться проектними організаціями й наглядовими органами під час проектування та оцінювання ефективності функціонування захисних споруд цивільного захисту. Визначено актуальні завдання для подальших наукових досліджень у напрямі підвищення захисту цивільного населення від уражень під час бойових дій за допомогою запропонованих критеріїв та методів.

**Постановка проблеми.** Важливим фактором, відповідно до якого визначається ефективність захисних споруд у будівельних об'єктах міської забудови, є здатність їхніх огорожувальних конструкцій зберігати свої огорожувальні функції в умовах бойових дій, блокувати вплив уражальних

факторів через авіаційні, ракетні та артилерійські обстріли, а також захищати людей від ураження уламками та осколками будівельних конструкцій. Також важливим аспектом, що розкриває ефективність захисних споруд, є можливість безпечної евакуації людей з місць руйнування будівельних конструкцій

об'єктів, в які вбудовані захисні споруди цивільного захисту, та об'єктів, які розташовані поряд із захисними спорудами цивільного захисту, після влучання в них бойових засобів ураження.

Недоліком у підході до формування захисних властивостей та критеріїв, які їх визначають, є те, що такі властивості зазвичай мають підземні захисні споруди цивільного захисту, а критерії, які їх зумовлюють, обмежені надлишковим тиском вибуху від бойових засобів ураження та коефіцієнтом захисту (послаблення іонізуючого випромінювання). Водночас сучасна будівельна галузь та досвід зарубіжних підходів свідчать про можливість використання наземних, надземних, вбудованих та прибудованих захисних споруд цивільного захисту, перевагою яких є зменшення часу укриття населення під час підвищеного ризику воєнного обстрілу.

Таким чином, на сьогодні є актуальна задача, яка потребує наукового обґрунтування нової нормативної бази, яка дасть змогу встановити зв'язок між здатністю конструкцій захисних споруд цивільного захисту зберігати свої захисні властивості та параметрами впливів від бойових засобів ураження.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Підхід щодо формування критеріїв, які зумовлюють захисні властивості захисних споруд цивільного захисту, обмежений лише двома критеріями: надлишковий тиск повітряної ударної хвилі та коефіцієнт захисту (зниження іонізуючого випромінювання) [14]. Такий підхід не забезпечує належного рівня захисту цивільного населення у захисних спорудах цивільного захисту, оскільки не враховує всіх небезпечних чинників, що можуть впливати на огорожувальні конструкції захисних споруд цивільного захисту під час воєнних обстрілів, зокрема кінетична енергія воєнного засобу ураження або його осколки, зруйновані будівельні конструкції споруд, в які вбудована захисна споруда цивільного захисту, або які розташовуються поруч із захисною спорудою цивільного захисту, сейсмічні впливи, спричинені воєнними засобами ураження.

Проведений аналіз зарубіжного досвіду [1–6] щодо проектування захисних споруд цивільного захисту показав, що окрім надлишкового тиску повітряної ударної хвилі та коефіцієнта захисту (зниження іонізуючого випромінювання) під час визначення конструктивних параметрів захисних споруд цивільного захисту значна увага приділяється прямому влучанню воєнного засобу ураження або його осколків у будівельні конструкції захисних споруд цивільного захисту [7–11].

Наприклад, в Ізраїлі у житловому секторі набули широкого застосування кімнати безпеки, відомі як захищений / укріплений простір. Основною задачею кімнат безпеки є забезпечення швидкого переміщення цивільного населення в захищені місця, в будь-який час доби [7]. Згідно із нормативними документами Ізраїлю кожна нова будівля повинна мати безпечну кімнату (мамад), побудовану із залізобетону з важким герметичним вікном і сталевими дверима, схожими на склепіння, які можуть захистити тих, хто перебуває всередині, від вибуху ракет і уламків або хімічної атаки [6].

**Формулювання цілей дослідження.** Зазначене зумовлює актуальність наукового дослідження, спрямованого на обґрунтування нової нормативної бази, яка дасть змогу встановити зв'язок між здатністю конструкцій захисних споруд цивільного захисту зберігати свої захисні властивості та параметрами впливів від бойових засобів ураження.

Таким чином, метою є дослідження ефективності функціонування захисних споруд цивільного захисту в умовах війни та пропонування напрямів підвищення рівня захисту цивільного населення через удосконалення нормативної бази щодо формування та оцінювання критеріїв, які визначають захисні властивості захисних споруд цивільного захисту.

Для її досягнення поставлено та розв'язано такі задачі:

- встановити нормативні критерії, які визначають захисні властивості захисних споруд цивільного захисту;

- провести аналіз та узагальнення статистичних даних щодо наявних захисних споруд цивільного захисту в Україні та визначити ступінь захищеності цивільного населення захисними спорудами цивільного захисту;

- провести аналіз пошкоджень будинків та споруд під час бойових дій та встановити ступінь їхнього пошкодження;

- встановити залежність середніх значень соціальних втрат від кількості прямих влучань снарядів у будівлі та споруди й залежність середніх значень соціальних втрат від кількості незначних пошкоджень у будівлях і спорудах;

- запропонувати додаткові критерії, які визначають захисні властивості захисних споруд цивільного захисту.

Об'єкт досліджень – функціонування захисних споруд в умовах бойових дій.

Предмет досліджень – методи прогнозування поведінки огорожувальних конструкцій захисних споруд в умовах бойових дій.

**Методи дослідження.** В роботі використано такі методи досліджень:

комплексний аналіз і узагальнення раніше виконаних робіт щодо оцінювання наслідків від надлишкового тиску вибуху воєнних засобів ураження, метод обробки статистичних даних під час узагальнення опитувальних анкет, метод експертних оцінок під час обґрунтування критеріїв та параметрів, які характеризують наслідки від вибухів, зумовлених воєнними засобами ураження, та розроблення пропозицій щодо внесення до нормативної бази, метод статистичного аналізу.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** За результатом аналізування статистичних даних, встановлено, що загальна нормативна потреба захисних споруд в Україні складає 59 931 загальною місткістю 7,1 млн осіб. Водночас обліковано в Україні 21 120 захисних споруд, з яких тільки 11% визнано такими, що придатні до експлуатації. На рис. 1 наведено розподіл захисних споруд цивільного захисту в регіонах України.

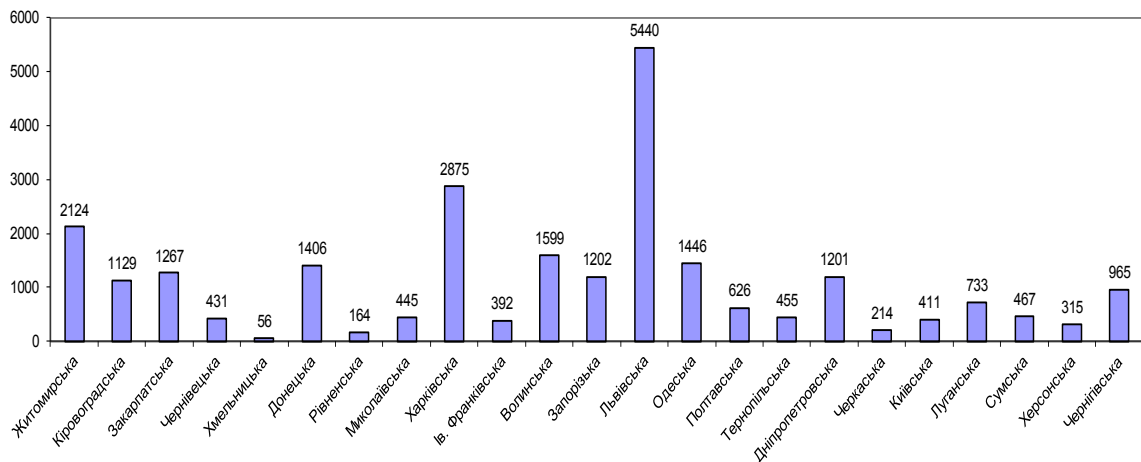


Рисунок 1 – Розподіл кількості укриттів у регіонах України (Джерело: дані щодо кількості захисних споруд в Україні, рисунок розроблений самостійно)

До даних, що наведені на рис. 1, не включені регіони, у яких відбуваються активні бойові дії, зважаючи на те, що збір цієї інформації є утрудненим і не може вважатися повністю об'єктивним. Для отримання більш повної інформації проаналізовано розподіл укриттів з

урахуванням кількості населення, що може укритися у захисних спорудах цивільного захисту. На рис. 2 наведений розподіл кількості захисних споруд цивільного захисту на 1 тис. населення в регіонах України.

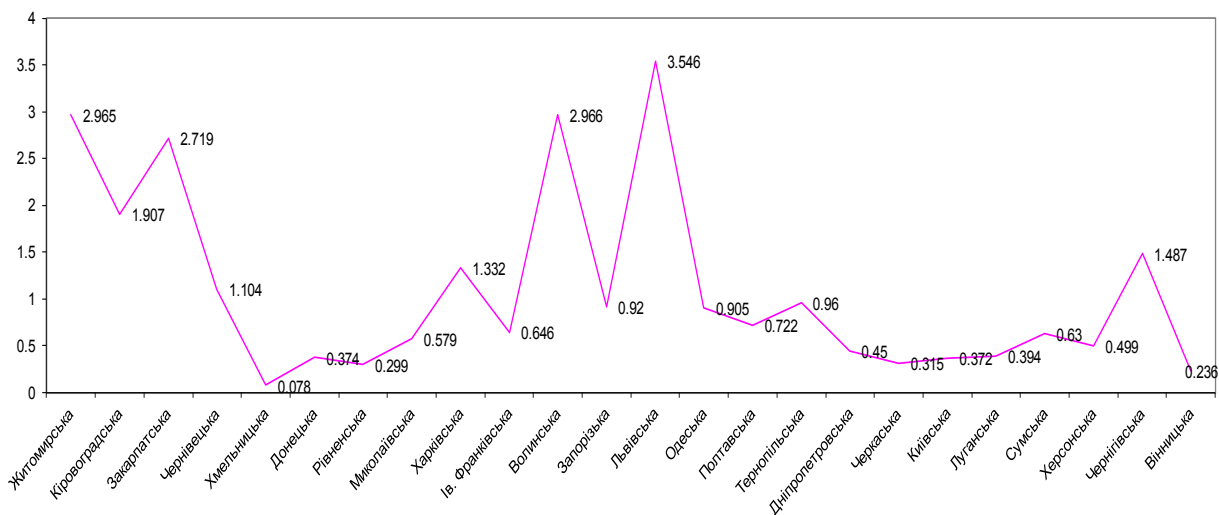


Рисунок 2 – Розподіл кількості захисних споруд цивільного захисту на 1 тис. населення  
Джерело: розроблено авторами

На основі статистичних даних досліджено розподіл у регіонах України захисних споруд цивільного захисту за їх типами. Результати зазначених досліджень наведено на рис. 3.

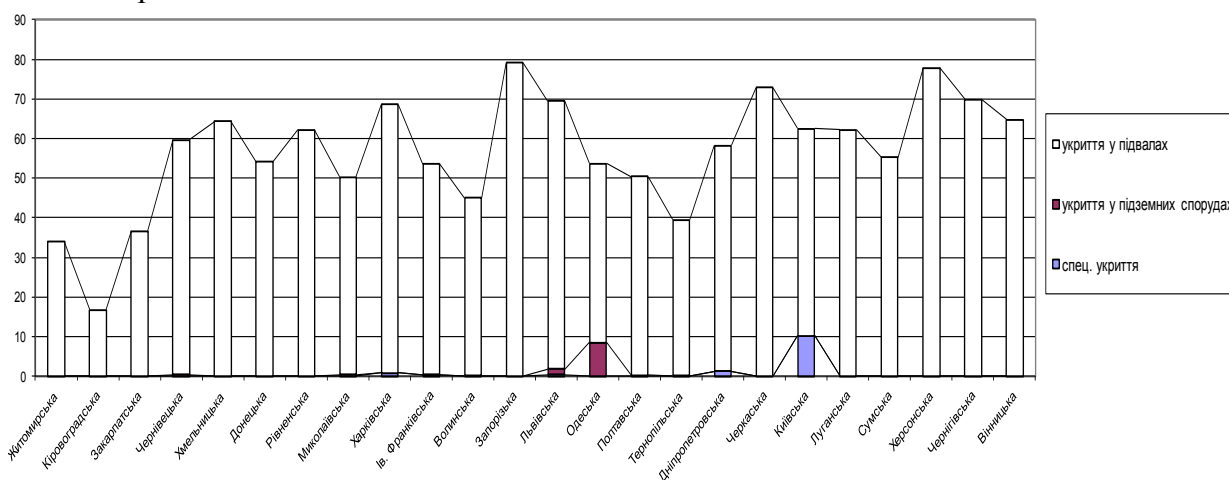


Рисунок 3 – Розподіл захисних споруд цивільного захисту за їх типами  
Джерело: розроблено авторами

Забезпечення населення захисними спорудами цивільного захисту проаналізовано за допомогою середніх величин, які наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Середні показники щодо забезпечення населення України захисними спорудами цивільного захисту

Середня кількість укриттів на 1 тис. осіб у межах міської забудови	Середній відсоток спеціально облаштованих укриттів, %	Середній відсоток укриттів у підземних спорудах (паркінгів, метро), %	Середній відсоток укриттів, облаштованих у підвалах будинків, %
1.1	0.55	0.49	55.7

Дані, наведені у табл. 1 показують, що у середньому в Україні на 1 тис. населення припадає близько 1 захисної

споруди цивільного захисту, причому більше половини з них облаштовані у підвалах будинків і споруд.

Проведені дослідження дають змогу зробити висновок, що у середньому кількість наявних захисних споруд цивільного захисту, які, на думку експертів, створюють безпечні умови, є явно недостатньою. Відчувається суттєвий брак спеціально облаштованих укриттів, у тому числі у підземних спорудах. Більше половини захисних укриттів облаштовані у підвалах будинків, безпека яких не є достатньо обґрунтованою.

Для розуміння статистичної картини пошкоджень будівель та споруд, спричинених обстрілами снарядами, проаналізовано розподіл ступеня пошкоджень будинків і споруд під час бойових дій в регіонах України. Такий статистичний аналіз проведено за допомогою анкетування.

На рис. 4 наведено розподіл ступеня пошкоджень будівель та споруд під час бойових дій у регіонах України.

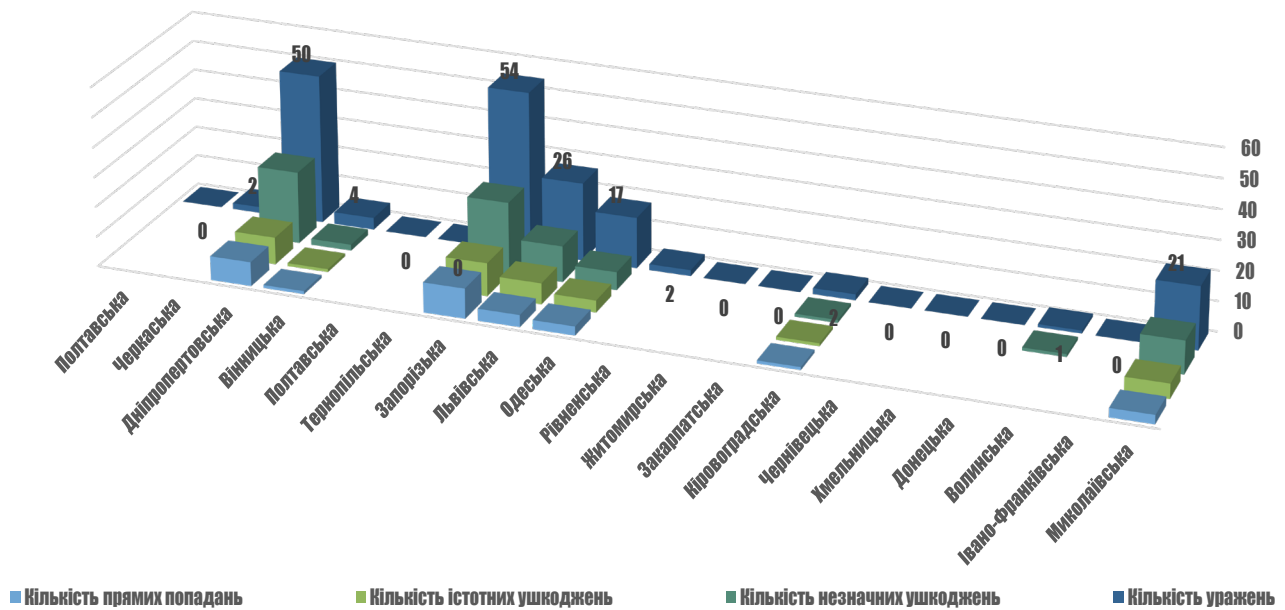


Рисунок 4 – Розподіл ступеня пошкоджень будівель та споруд під час бойових дій у регіонах України  
Джерело: розроблено авторами

Отримані статистичні результати вказують на кореляцію випадків прямих влучань снарядів, незначних та значних пошкоджень із загальною кількістю випадків уражень будівель у зазначеному регіоні України.

Використовуючи отримані дані анкетування, проаналізовано ступені пошкоджень будівель та споруд і визначено відповідні середні величини, які наведено у табл. 2.

Таблиця 2 – Середні показники щодо типів пошкоджень будівель

Частка прямих влучань, %	Частка будівель із несуттєвими пошкодженнями, %	Частка будівель із суттєвими пошкодженнями, %
16.949	45.763	22.599
Похибка, %		
4.692	11.983	7.115

Аналізуючи дані табл. 2, можна зауважити, що найбільша частка влучань

воєнних засобів уражень призводить до незначних пошкоджень будинків і споруд.

Згідно із табл. 2 похибка отриманих значень є незначною. Отримана похибка визначалася порівняно з отриманими даними, що одержані для регіонів, які охоплені бойовими діями і мають статистику уражень на один чи два

порядки більше, ніж в інших регіонах України.

Наявні соціальні втрати проаналізовано та побудовано відповідні розподіли втрат у регіонах України. Водночас одержані розподіли наведено на рис. 5.

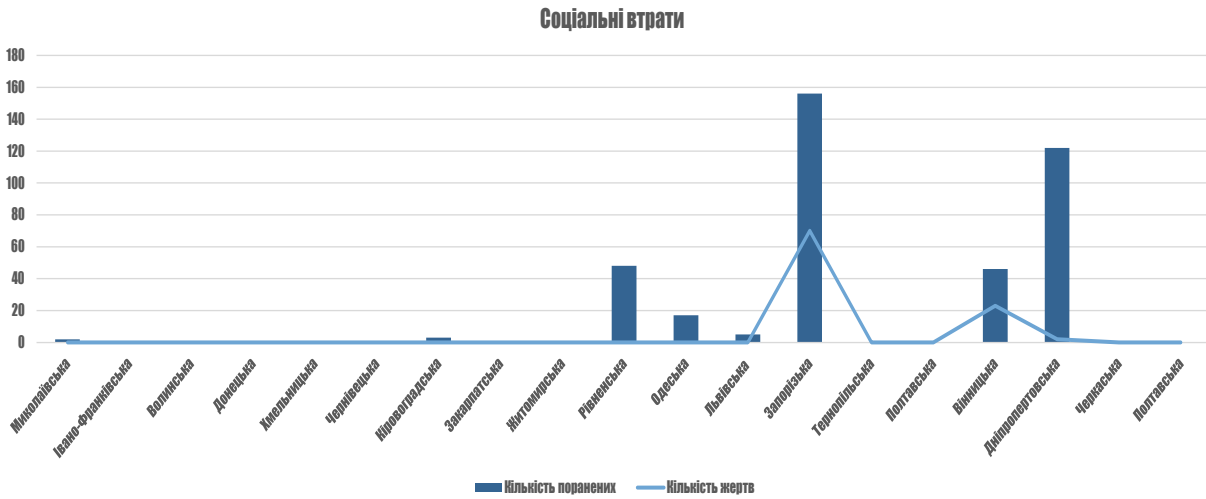


Рисунок 5 – Розподілення випадків соціальних втрат у регіонах України (Джерело: дані щодо кількості захисних споруд в Україні, рисунок розроблений самостійно)

Для аналізу кореляції між даними щодо прямих влучань снарядів і кількістю соціальних втрат встановлено залежність середніх значень соціальних втрат від кількості прямих влучань снарядів у

будівлі та споруди, а також залежність середніх значень соціальних втрат від кількості незначних пошкоджень у будівлях і спорудах (рис. 6 та 7).

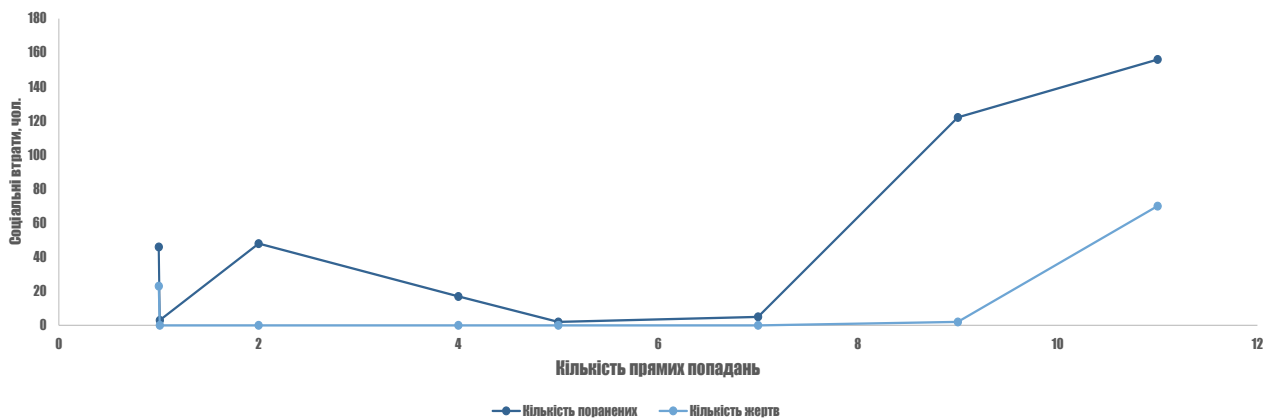


Рисунок 6 – Залежності середніх значень соціальних втрат від кількості прямих влучань снарядів у будівлі (Джерело: дані щодо кількості захисних споруд в Україні, рисунок розроблений самостійно)

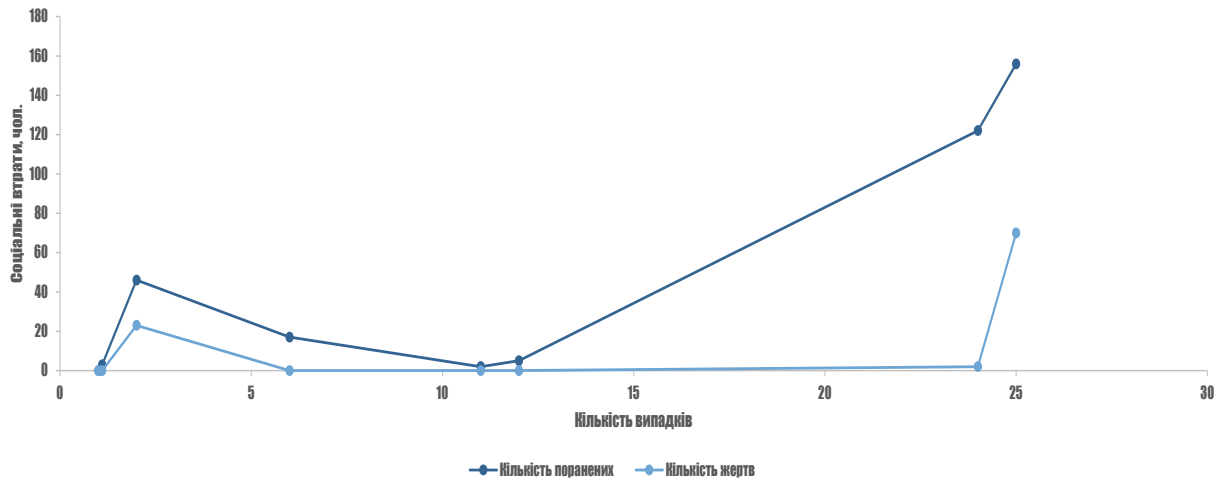


Рисунок 7 – Залежності середніх значень соціальних втрат від кількості незначних пошкоджень у будівлях (Джерело: дані щодо кількості захисних споруд в Україні, рисунок розроблений самостійно)

Графіки, наведені на рис. 6 та 7, свідчать про те, що суттєву кореляцію між випадками пошкодження будівель та соціальними втратами можна простежити, коли значення прямих влучань перевищує значення 7, а кількість випадків незначних пошкоджень перевищує 20.

Для узагальненого аналізу зв'язку між пошкодженнями будівель та кількістю жертв використано усереднені величини. Отримані усереднені величини зведені у табл. 3.

Таблиця 3 – Середні показники щодо типів соціальних втрат залежно від ступеня пошкодження будівель

Частка жертв у будівлях із пошкодженнями огороження та фасадних систем, %	Частка жертв у будівлях із незначними пошкодженнями, %	Частка жертв у будівлях із суттєвими ураженнями, %	Частка жертв у будівлях із повним обваленням, %
36.9	49.2	9.5	4.4

Дані табл. 3 показують, що найбільше соціальних втрат спостерігається у разі незначних пошкоджень будівель (до 86%).

Згідно із чинними нормативними документами [13] небезпечними впливами, які враховуються під час оцінки захисних властивостей захисних споруд цивільного захисту є надлишковий тиск повітряної ударної хвилі та ступінь послаблення іонізуючого випромінювання. Разом із цим зазначені критерії не враховують всіх небезпечних навантажень на будівельні конструкції захисних споруд цивільного захисту, що зумовлені бойовими діями. Серед таких специфічних загроз можуть бути:

- прогресуюче руйнування для забезпечення концепції «одинична живучість», яка передбачає, що у разі

аварійних дій у каркасі допускаються локальні обвалення окремих несучих елементів у межах одного поверху (видалення колони, плити перекриття, балки тощо), але ці початкові обвалення не повинні призводити до обвалення або руйнування конструкції, на які передається навантаження, що раніше сприймалися елементами, пошкодженими від аварійної дії;

- стійкість огорожувальних конструкцій захисних споруд цивільного захисту до проникнення бойового засобу ураження або його осколків;

- сейсмічні навантаження, зумовлені бойовими засобами ураження;

- завалення виходів із захисних споруд цивільного захисту уламками будівельних конструкцій від зруйнованих будинків і споруд, в які вбудовані захисні

споруди цивільного захисту, або поруч розташованих будинків і споруд.

**Висновки та напрями подальших досліджень.** Таким чином, у роботі викладені наукові результати, які забезпечують розв'язання актуальної задачі щодо удосконалення методичної та нормативної бази, що дасть змогу встановити зв'язок між здатністю конструкцій захисних споруд цивільного захисту зберігати свої захисні властивості та параметрами впливів від бойових засобів ураження. Водночас зроблені такі висновки.

Виявлено, що будівлі в Україні зазнали суттєвих уражень під час обстрілів як на території активних бойових дій, так і на відносно спокійній території; з'ясовано, що частка прямих влучань становить близько 16%.

Виявлено, що загалом помітну кореляцію між зростанням жертв та кількістю випадків пошкоджень може бути відстежено, якщо кількість випадків пошкоджень у середньому перевищує 20, а кількість прямих влучань ракетних снарядів перевищує 7.

Встановлено перелік критеріїв, які характеризують наслідки вибуху від воєнних засобів ураження на конструктивні параметри захисних споруд цивільного захисту, а саме: повітряна ударна хвиля під час застосування

звичайних засобів ураження та побічної дії сучасної зброї масового ураження з розрахунковим надмірним тиском; ступінь послаблення зовнішнього іонізуючого випромінювання (коефіцієнт захисту  $K_z$ ); місцева та загальна дія засобів ураження; стійкість зовнішніх огорожувальних конструкцій до впливу додаткових динамічних та статичних навантажень від конструкцій інших будівель і споруд, що може бути зруйновано; сейсмічні впливи, які спричинені бойовими засобами. Як додатковий критерій запропоновано використовувати «глибину проникнення» засобу ураження у конструкцію захисної споруди.

Встановлено, що руйнівна здатність сучасних воєнних засобів ураження залежить від характеристик заряду бойової частини, який може бути виражений в тротиловому еквіваленті, а захисні властивості огорожувальних конструкцій захисних споруд цивільного захисту залежать від матеріалу, з якого вони виконані, та його товщини.

У подальших наукових дослідженнях необхідно провести перевірку запропонованих критеріїв, які визначають захисні властивості захисних споруд цивільного захисту, та методів їх оцінювання.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Technical requirements for storey shelters SCDF from September 2015.
2. Technical requirements for household shelters SCDF from August 2012.
3. Israeli standards 5075. The Legal Standards for a Protected Area. Guidelines for Applying Protected Area Management Categories.
4. Specification for engineering design in protected spaces. Maritime Policy for Israel's Mediterranean Waters from May 2020, Israel.
5. Report of the detailed findings of the independent international Commission of inquiry on the protests in the Occupied Palestinian Territory. Specification for examining solutions for protection on the door of the protected space from 2018, Israel.
6. Technical requirements for storey shelters SCDF from 31 December 2021.
7. The safest room in the house: вебсайт. URL : <https://www.timesofisrael.com/the-safest-room-in-the-house/> (last accessed : 08.05.2023).
8. The do's and dont's of the mamad : вебсайт. URL: <https://derorit.co.il/the-dos-and-donts-of-the-mamad/> (last accessed : 08.05.2023).
9. Merkhav Mugan : вебсайт. URL : [https://en.wikipedia.org/wiki/Merkhav\\_Mugan](https://en.wikipedia.org/wiki/Merkhav_Mugan) (last accessed : 08.05.2023).
10. What is a Safe Room? The Moat Around Your Castle Has Gone High-Tech : вебсайт. URL : <https://www.thoughtco.com/safe-room-what-is-a-safe-room-177327> (last accessed : 08.05.2023).
11. Ізраїль: бомбосховище у квартирі : вебсайт. URL: <https://www.bbc.com/ukrainian/news-57008150> (дата звернення : 08.05.2023).
12. Inside Switzerland's largest nuclear bunker : вебсайт. URL : <https://www.thelocal.ch/20161020/inside-switzerlands-largest-nuclear-bunker-40-years-on> (дата звернення : 08.05.2023).
13. Посилена безпека : Львів запроваджує нові стандарти будівництва житла : вебсайт. URL : <https://city-adm.lviv.ua/news/culture/architecture-and-historic-heritage/291541-posylena-bezpeka-lviv-zaprovadzhuie-novi-standarty-budivnytstva-zhytla> (last accessed : 08.05.2023).



14. ДБН В.2.2-5-97 «Будинки та споруди. Захисні споруди цивільного захисту». [Чинний від 01.01.1998]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 1997, 34 с. (Державні будівельні норми).
15. Кодекс цивільного захисту України : Закон України від 02.10.2012 р. № 5403-VI // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text> (дата звернення : 08.05.2023).

## REFERENCES

1. Technical requirements for storey shelters SCDF from September 2015. [in English].
2. Technical requirements for household shelters SCDF from August 2012. [in English].
3. Israeli standards 5075. The Legal Standards for a Protected Area. Guidelines for Applying Protected Area Management Categories. [in English].
4. Specification for engineering design in protected spaces. Maritime Policy for Israel's Mediterranean Waters from May 2020, Israel. [in English].
5. Report of the detailed findings of the independent international Commission of inquiry on the protests in the Occupied Palestinian Territory. Specification for examining solutions for protection on the door of the protected space from 2018, Israel.
6. Technical requirements for storey shelters SCDF from 31 December 2021. [in English].
7. The safest room in the house: website. Retrived from : <https://www.timesofisrael.com/the-safest-room-in-the-house/>. [in English].
8. The do's and dont's of the mamad: website. Retrived from : <https://derorit.co.il/the-dos-and-donts-of-the-mamad/>. [in English].
9. Merkhav Mugan: website. Retrived from : [https://en.wikipedia.org/wiki/Merkhav\\_Mugan](https://en.wikipedia.org/wiki/Merkhav_Mugan).
10. What Is a Safe Room? The Moat Around Your Castle Has Gone High-Tech: website. Retrived from : <https://www.thoughtco.com/safe-room-what-is-a-safe-room-177327>. [in English].
11. Israel: bomboskhovyshche u kvartyri: website. Retrived from : <https://www.bbc.com/ukrainian/news-57008150>. [in English].
12. Inside Switzerland's largest nuclear bunker : website. Retrived from : <https://www.thelocal.ch/20161020/inside-switzerlands-largest-nuclear-bunker-40-years-on>. [in English].
13. Posylena bezpeka: Lviv zaprovadzhuie novi standarty budivnytstva zhytla: website. Retrived from : <https://city-adm.lviv.ua/news/culture/architecture-and-historic-heritage/291541-posylena-bezpeka-lviv-zaprovadzhuie-novi-standarty-budivnytstva-zhytla>. [in English].
14. ДБН В.2.2-5-97 «Будинки та споруди. Захисні споруди тсвилноho захисту». [Чинний від 01.01.1998]. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 1997, 34 с. (Державні будівельні норми). [in English].
15. Кодекс тсвилноho захисту Украйни: Закон Украйини від 02.10.2012 № 5403-VI // База даних «Законодавство Украйини» / Верховна Рада Украйини. Retrived from : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text> [Code of Civil Protection of Ukraine : Law of Protection of Ukrayine : dated 02.10.2012 № 5403-VI // Database «Legislation of Ukraine» / The Verkhovna Rada of Ukraine]. (data zvernennia : 08.05.2023) [in Ukrainian].

## PECULIARITIES AND PROSPECTS OF EFFECTIVE FUNCTIONING OF PROTECTIVE STRUCTURES OF CIVIL PROTECTION IN CONDITIONS OF HOSTILITIES

S. Pozdieiev<sup>1</sup>, V. Nizhnyk<sup>2</sup>, V. Nekora<sup>2</sup>, V. Mykhailov<sup>2</sup>, Y. Lutsenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Cherkasy Institute of Fire Safety named after Heroes of Chernobyl of the National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine*

<sup>2</sup>*Institute of Public Administration and Research in Civil Protection, Ukraine*

KEYWORDS: ANNOTATION

protective structures of civil defense, criteria that determine protective properties, methods of evaluating properties of protective structures, approval, design parameters, combat means of defeat.	The shortcomings of the existing approach to the formation of the protective properties of protective structures of civil defense and the criteria that determine the protective properties of protective structures of civil defense are shown. Statistical data on the functioning of civil defense protective structures in Ukraine are analyzed and the state of protection of the population per one thousand people is shown. Statistical data on damage to buildings and structures on the territory of Ukraine as a result of hostilities and data characterizing the level of such damages, as well as data on social losses of the population who were in buildings and structures that were damaged during hostilities, are presented. The behavior of the enclosing properties of building structures of protective structures and shelters under the influence of explosions and mechanical impulse actions of combat weapons caused by air and artillery fire was analyzed. The dependence of the average values of social losses of the population on the number of direct projectile hits in buildings and structures is given. An analysis of the criteria standardized in Ukraine, which determine the protective properties of protective structures of civil defense, was carried out. An improved list of such criteria and a methodology for their determination depending on the structural parameters of civil defense protective structures are proposed. The results of the work will become a prerequisite for further research in terms of substantiating the structural parameters of the security premises of residential and public buildings under martial law conditions and will be used by project organizations and supervisory bodies during the design and evaluation of the effectiveness of the functioning of civil defense protective structures. Urgent tasks for further scientific research in the direction of increasing the protection of the civilian population from damage during hostilities by approving the proposed criteria and methods have been identified
--	--

# Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека

науковий журнал  
ISSN 2518-1777

Підписано до друку 27.06.2023  
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.