# НАУКОВИЙ ВІСНИК: Цивільний захист та пожежна безпека

# № 1 (13), 2022

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

**ISSN 2518-1777**



**Редакційна колегія:**

*головний редактор – голова редколегії*
*д-р техн. наук* ***Поздєєв С. В.***

*заступник головного редактора*
*канд. техн. наук* ***Коваленко В. В.***

*відповідальний секретар*
*канд. техн. наук* ***Огурцов С. Ю.***

*д-р техн. наук* ***Тютюник В. В.***
*д-р техн. наук* ***Цапко Ю. В.***
*д-р техн. наук* ***Ніжник В. В.***
*канд. техн. наук* ***Лавренюк О. І.***
*канд. техн. наук* ***Лоїк В. Б.***
*канд. техн. наук* ***Кропивницький В. С.***
*канд. техн. наук* ***Новак С. В.***
*канд. техн. наук* ***Пазен О. Ю.***
*канд. техн. наук* ***Паснак І. В.***
*канд. техн. наук* ***Сізіков О. О.***
*канд. хім. наук* ***Ліхньовський Р. В.***
*PhDEng.* ***Врублевський Д.***
*PhDEng.* ***Самберг А.***

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

*Випусковий редактор* ***Борисова А. С.***



*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 передруковування матеріалів письмовий дозвіл ІДУ НД ЦЗ є обов'язковим*



*Рекомендовано до видання рішенням Вченої ради ІДУ НД ЦЗ*

*Протокол від 27. 06.2022 № 7*

*Ідентифікатор випуску DOI:*
*https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.1*

*Підписано до друку* 27.06.2022

*Формат* 60 × 84/8
*Наклад 50 прим.*



**Адреса редакції:**

04074*, м. Київ, вул. Вишгородська, 21*
**Телефони:**
(+380) (44) 430-02-85
https://nvcz.undicz.org.ua
e-mail: niv1966@ukr.net

**ЗМІСТ**

**С. Новак, О. Добростан, О. Абрамов**
Вплив параметрів засобів вимірювання температури в печі на результати випробувань будівельних конструкцій і виробів на вогнестійкість **4**

**В. Ніжник, О. Сізіков, Ю. Фещук, Я. Балло, О. Жихарєв, А. Циганков**
Актуальні питання розроблення вимог протипожежного захисту зарядних станцій для електромобілів **15**

**А. Кодрик, В. Коваленко, О. Тітенко, А. Борисов, І. Стилик, А. Борисова**
Шляхи підвищення ефективності водних вогнегасних речовин на основі рідкого скла **24**

**А. Михайлова**
Метод визначення необхідного складу типових організаційних структур єдиної державної системи цивільного захисту на довгострокову перспективу **35**

**В. Юрченко, О. Соколовський**
Питання виробництва сучасних засобів індивідуального захисту населення та формувань цивільного захисту **47**

**С. Панченко, В. Ніжник, А. Биченко, Ю. Луценко**
Аналіз досліджень щодо впливу сил поверхневого натягу на дисперсність крапель під час гасіння лісових пожеж авіаційною технікою **55**

**В. Ніжник, С. Поздєєв, Д. Добряк, Ю. Підгорецький, К. Потетня, О. Крикун**
Розроблення методики проєктування систем легкоскидних конструкцій на основі гнучких полімерних матеріалів **64**

**CONTENT**

**S. Novak, O. Dobrostan, O. Abramov**
Influence of parameters of means of temperature measurement in the furnace on the results of fire resistance tests of building structures and products **4**

**V. Nizhnyk, O. Sizikov, Yu. Feshchuk, Ya. Ballo, O. Zhikharev, A. Tsyhankov**
Current issues of developing requirements of fire protection of charging stations for electric vehicles **15**

**A. Kodryk, V. Kovalenko, O. Titenko, A. Borysov, I. Stylyk, A. Borysova**
Ways of increasing the effectiveness of aqueous fire extinguishing agent based on liquid glass **24**

**A. Mykhailova**
The method for the determination of the necessary composition of typical organizational structures of the united national civil protection system for the long term perspective **35**

**V. Yurchenko, O. Sokolovsky**
Issues of production of modern means of individual protection of the population and formations of civil protection **47**

**S. Panchenko, V. Nizhnyk, A. Bychenko, Yu. Lutsenko**
Analysis of research on the influence of surface tension forces on the dispersity of drops during extinguishing forest fire by aviation equipment **55**

**V. Nizhnyk, S. Pozdieiev, D. Dobriak, Yu.Pidhoretskiy, K. Potetnya, O. Krykun**
Development of methods of designing systems of easy-dropped construction on the basis of flexible polymeric materials **64**

**А. Одинець, В. Ніжник, О. Сізіков, Ю. Фещук, Я. Балло, Р. Климась, О. Жихарєв**

Обґрунтування додаткових заходів щодо оперативних дій під час гасіння пожеж на складах нафтопродуктів в умовах бойових дій **72**

**A. Odinets, V. Nizhnyk, O. Sizikov, Yu. Feshchuk, Ya. Ballo, R. Klymas, O. Zhikharev**

Justification of additional measures for operational actions during fire extinguishing in petroleum products warehouses in conditions of combat

**В.-П. Пархоменко, П. Борисяк, О. Лавренюк, Б. Михалічко**

Технологія вогнезахисту деревини покриттями на основі модифікованих епоксіамінних композицій **80**

**V.-P. Parkhomenko, P. Borysiak, O. Lavrenyuk, B. Mykhalichko**

Technology of fire protection of wood with coatings based on modified epoxy-amine composites

**С. Новак, В. Дріжд, О. Добростан, М. Новак**

Вплив теплофізичних властивостей вогнезахисних матеріалів на тепловий стан сталевих колон за стандартного температурного режиму **88**

**S. Novak, V. Drizhd, O. Dobrostan, M. Novak**

Influence of thermophysical characteristics of fire-retardant materials on the thermal state of steel columns under standard temperature regime

*УДК 614.841.45*

# ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ В ПЕЧІ НА РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАНЬ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ І ВИРОБІВ НА ВОГНЕСТІЙКІСТЬ

*https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.1.4-14*

Новак С. В[1]*., ORCID iD 0000-0001-7087-318X
Добростан О. В[1]., ORCID iD 0000-0001-8908-0729
Абрамов О. О[2].
*E-mail: novak.s.fire@gmail.com

*[1]Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Україна*
*[2]Випробувальний центр ТОВ «ТЕСТ», Україна*

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

*Надійшла до редакції: 16.03.2022*
*Пройшла рецензування: 15.04.2022*

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

будівельні конструкції; вогнестійкість; випробування; засоби вимірювання температури; пластинчасті термометри; стрижневі термопари; стандартний температурний режим

АНОТАЦІЯ

Через відмінність у конструкціях засобів вимірювальної техніки, які застосовують згідно з національним і європейським стандартами для вимірювання температури в печі, не можна виключати невідповідності у створенні цими засобами однакового теплового впливу на зразки конструкцій для випробування, що може впливати на результати перевірки будівельних конструкцій і виробів на вогнестійкість, які проведено за національними та європейськими принципами. Така невизначеність зумовила проведення дослідження впливу параметрів засобів вимірювання температури в печі на результати випробувань будівельних конструкцій і виробів на вогнестійкість. У дослідженні ставилося за мету оцінювання збіжності результатів випробувань будівельних конструкцій і виробів на вогнестійкість, отриманих із застосуванням різних засобів вимірювання температури в печі (стрижневих термопар і пластинчастих термометрів), параметри яких наведено в національному і європейському стандартах (ДСТУ Б В.1.1-4-98* і EN 1363-1:2020). Для цього було вирішено завдання щодо визначення різниці між показами пластинчастих термометрів і стрижневих термопар в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму в печі та оцінки змінення проміжків часу до досягнення граничних станів будівельних конструкцій і виробів за вогнестійкістю у разі використання для вимірювання температури в печі пластинчастих термометрів замість стрижневих термопар. Виявлено, що найбільші значення вказаної вище різниці, які складають десятки відсотків, фіксуються у перші п’ять хвилин вогневого впливу, а з підвищенням цієї тривалості зазначена різниця значно зменшується – до декількох відсотків. Встановлено, що у разі застосування для вимірювання температури в печі пластинчастих термометрів можна прогнозувати отримання менших проміжків часу до досягнення граничних станів конструкцій за вогнестійкістю, ніж під час використання стрижневих термопар. Відмінність між результатами випробувань на вогнестійкість, отриманими із застосуванням пластинчастих термометрів і стрижневих термопар, може бути найбільшою для будівельних конструкцій та виробів з нормованим проміжком часу класифікації за вогнестійкістю, який становить 15 хвилин.

**Постановка проблеми.** Відповідно до національних і європейських принципів випробувань будівельних конструкцій та виробів на вогнестійкість, які зазначено в ДСТУ Б В.1.1-4-98* [1] і EN 1363- 1:2020 [2], для оцінювання вогнестійкості застосовують випробувальне обладнання і засоби вимірювальної техніки, зокрема засоби для визначення температури в печі та зразка конструкції, яку випробовують. У печі створюють стандартний або інший номінальний температурний режим, який контролюють відповідними засобами вимірювання, і протягом вогневого впливу на зразок для випробування певної тривалості визначають його тепловий і (або) напружено-деформований стани. За результатами аналізу цих станів роблять висновок про вогнестійкість конструкції, яку випробовували.

Під час цих випробувань зазвичай застосовують стандартний температурний режим. Номінальна залежність температури в печі від тривалості вогневого впливу для цього режиму є однаковою для вказаних вище національного та європейського стандартів і визначається за такою формулою:

$$T_S = 345\lg(8t + 1) + 20, \quad (1)$$

де $t$ – проміжок часу, що відраховується від початку вогневого впливу, хв;

$T_s$ – температура в печі, яка відповідає проміжку часу $t$, °С.

Для вимірювання температури в печі застосовують різні засоби. Згідно з ДСТУ Б В.1.1-4-98* [1] для цього необхідно використовувати стрижневі термопари з діаметром дроту не більше 1,5 мм з неізольованим вимірювальним спаєм. Відповідно до EN 1363-1:2020 [2] цими засобами є пластинчасті термометри, що являють собою збірки, які складаються (див. рис. 1): із вигнутої пластини, виготовленої зі сплаву нікелю, термопари, прикріпленої до неї, і теплоізоляційного матеріалу.

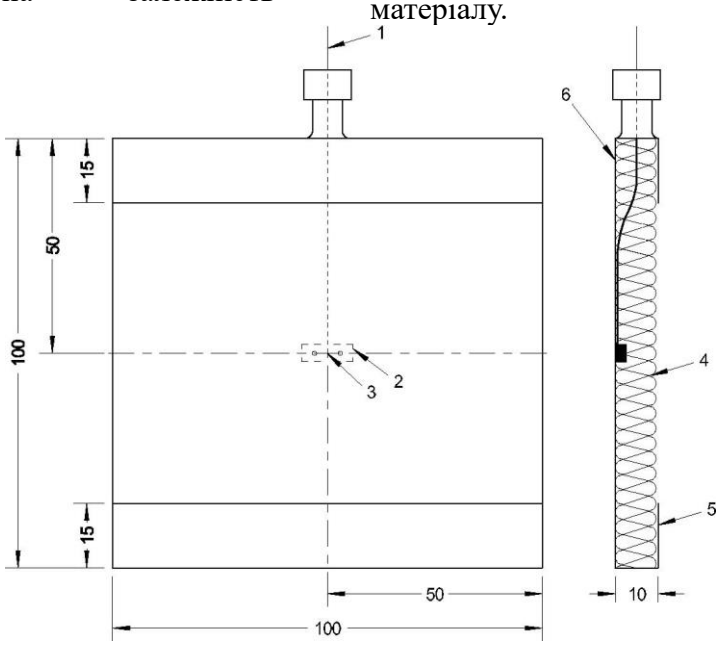



*Рисунок 1* – Будова пластинчастого термометра для вимірювання температури в печі відповідно до EN 1363-1:2020 [2]

1 – термопара в оболонці з ізольованим вимірювальним спаєм; 2 – сталева смужка, прикріплена точковим зварюванням або гвинтами; 3 – вимірювальний спай; 4 – теплоізоляційний матеріал (орієнтований у напрямку зразка для випробування); 5 – смужка зі сплаву нікелю товщиною (0,7 ± 0,1) мм; 6 – бік «А»

*Джерело:* розроблено авторами

Через відмінність в конструкціях засобів вимірювальної техніки, які застосовують за національним і європейським стандартами (ДСТУ Б В.1.1-4-98* [1] і EN 1363-1:2020 [2]) для вимірювання температури в печі, не можна виключити невідповідності у створенні в печі із застосуванням цих засобів однакового теплового впливу на зразки конструкцій для випробування, що може впливати на результати оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій і виробів. Така невизначеність зумовила проведення дослідження впливу параметрів засобів вимірювання температури в печі на результати випробувань будівельних конструкцій та виробів на вогнестійкість.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** За напрямом оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій та виробів проведено значну кількість досліджень, які опубліковані у вітчизняних і зарубіжних виданнях. Було визначено вплив параметрів конструкцій на їхню вогнестійкість, застосовуючи експериментальні методи, які ґрунтуються на оцінюванні теплового стану конструкцій в умовах вогневого впливу за стандартним температурним режимом (формула (1)).

Так, у роботі [3] наведено результати дослідження впливу параметрів системи вогнезахисту на вогнестійкість сталевих колон. Показано, що застосування вогнезахисних екранів призводить до значного підвищення вогнестійкості цих конструкцій, а ефективність застосування екранів більша у разі наявності на поверхні колони пасивного покриття, ніж реактивного матеріалу. Під час розвідок [4] визначено дані щодо вогнестійкості сталевих конструкцій, захищених реактивним покриттям, які необхідні для його практичного застосування. Результати дослідження впливу зовнішнього покриття на ефективність реактивних вогнезахисних матеріалів для сталевих конструкцій надано в роботі [5]. У науковій праці [6] встановлено особливості залежності температури сталевих конструкцій з комбінованою системою вогнезахисту від тривалості вогневого впливу за стандартним температурним режимом. Визначено, що у разі застосування комбінованої системи вогнезахисту закономірним є підвищення тривалості досягнення критичної температури сталі порівняно з пасивною та реактивною системами вогнезахисту, що зумовлено ефективним поєднанням фізико-хімічних властивостей пасивного і реактивного вогнезахисних матеріалів. У роботі [7] наведено дані щодо поведінки сталевих колон з частковим пошкодженням вогнезахисту в умовах вогневого впливу, які дають змогу прогнозувати вогнестійкість таких сталевих конструкцій. За результатами дослідження, опублікованого в [8], визначено особливості розподілу температури на необігрівній поверхні сталевих повітроводів в умовах вогневого впливу і характеристики вогнестійкості сталевих повітроводів з комбінованою системою вогнезахисту. Показано, що найбільші значення температура має на необігрівній поверхні повітроводу біля місця його ущільнення у вертикальній огороджувальній конструкції. В роботі [9] надано результати дослідження вогнестійкості кабельних проходок, у конструкції яких застосовано реактивний вогнезахисний матеріал, визначено вплив конструкційних параметрів цих кабельних проходок на їхню вогнестійкість.

Слід зауважити, що зазначені вище дослідження вогнестійкості будівельних конструкцій і виробів були проведені із застосуванням випробувальних печей різної конструкції і різних засобів для вимірювання температури в печі. Так, у роботах [3; 6; 8–9], використовували стрижневі термопари, а в інших – пластинчасті термометри. Для отримання відтворюваних результатів оцінювання вогнестійкості важливо, щоб теплові впливи на зразки конструкцій, які підлягають випробуванню, забезпечувані печами, були у заданих межах.

Основним джерелом інформації щодо теплового впливу на зразок, який випробовують на вогнестійкість,

є температура газоподібних продуктів у печі [10]. Температура, індикацію якої подає відносно проста термопара, використовувана для контролювання параметрів у печі, насправді визначається складною рівновагою між конвекційним перенесенням теплоти від газоподібних продуктів у печі та теплообміном випромінюванням між стінками печі й зразком для випробування. На цю рівновагу впливають такі параметри, як теплова інерція стінок печі та зразка для випробування, а також характеристики випромінювальної здатності (вміст кіптяви, дійсні розміри, геометричні параметри полум'я) печі. Відповідно показ термопари в печі залежить складним чином від теплових властивостей печі. Оскільки термопари в печі використовують для контролювання параметрів у ній, те саме стосується і теплового впливу на зразок для випробування.

У роботі [11] наведено порівняння результатів оцінювання теплового впливу на зразки для випробування у повномасштабній (стандартній) печі (4 м шириною, 5 м довжиною і 3 м глибиною) і середньомасштабній (нестандартній) печі (1,2 м шириною, 1,8 м довжиною і 0,5 м глибиною) як для вертикальної, так і для горизонтальної орієнтацій зразка. Згідно з отриманими результатами тепловий вплив у середньомасштабній печі дещо вищий (до 15 %), ніж у повномасштабній, а різниця у тепловому впливі для обох напрямків є незначною (до 4 %).

У науковій праці [12] розглянуто експлуатаційні характеристики шести різних типів засобів вимірювання температури у вертикальних і горизонтальних випробувальних печах, таких як: термопари в захисній оболонці, конструкція яких відповідає ASTM E119:2020 [13]; пластинчасті термометри; спрямовані полум'яні термометри; термопари з неізольованим вимірювальним спаєм; заземлені та незаземлені термопари з оболонкою із нікель-хромового сплаву. Показано, що термопари із заземленою і незаземленою оболонкою із нікель-хромового сплаву забезпечують порівнянні результати з термопарами з неізольованим вимірювальним спаєм і є найбільш придатними, якщо бажаний швидкий час відгуку (мала теплова інерційність). Через швидкий час відгуку та хорошу довговічність ці заземлені та незаземлені термопари добре підходять для вимірювання температури у випробувальних печах. Прогнозований і виміряний падаючі теплові потоки у печах, керованих термопарами з неізольованим вимірювальним спаєм або заземленими і незаземленими термопарами, добре узгоджуються.

Результати, наведені в роботі [14], показують, що під час керування випробувальними печами за допомогою термопар малого діаметра з оболонкою тепловий вплив на зразок конструкції сильно відрізняється в різних печах. Керування печами за показами пластинчастих термометрів значно зменшує цю різницю і зближує рівні теплового впливу на зразки, які випробовують в різних печах.

Незважаючи на практичну значущість результатів наведених вище досліджень, не розглянуто в достатній мірі вплив параметрів засобів вимірювання температури в печі на результати випробувань будівельних конструкцій і виробів на вогнестійкість, що зумовлює необхідність проведення дослідження в цьому напрямі.

**Формулювання цілей досліджень.** За мету ставилась оцінка збіжності результатів випробувань будівельних конструкцій та виробів на вогнестійкість, отриманих із застосуванням різних засобів вимірювання температури в печі (стрижневих термопар і пластинчастих термометрів), параметри яких наведено в національному та європейському стандартах (ДСТУ Б В.1.1- 4-98* [1] і EN 1363-1:2020 [2]).

Для досягнення цієї мети було поставлено такі завдання:

– визначити різницю між показами пластинчастих термометрів і стрижневих

термопар в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму в печі;

– оцінити змінення проміжків часу до досягнення граничних станів будівельних конструкцій і виробів за вогнестійкістю у разі використання для вимірювання температури в печі пластинчастих термометрів замість стрижневих термопар.

**Методи дослідження.** Застосовано експериментальний метод, який ґрунтується на положеннях європейського стандарту EN 1363-1:2020 [2].

У горизонтальну піч, ширина, глибина та висота вогневої камери якої становлять відповідно 1800 мм, 1800 мм і 2500 мм, на відстані (100 ± 10) мм від обігрівної поверхні покриття печі встановлювали такі засоби вимірювання температури в печі:

– дві стрижневі термопари з діаметром дроту 1,2 мм з неізольованим вимірювальним спаєм;

– два пластинчасті термометри (далі – промислові пластинчасті термометри), які відповідають конструкції, наведеній на рис. 1, і виготовлені в промислових умовах;

– два пластинчасті термометри (далі – модифіковані пластинчасті термометри), які відповідають конструкції, наведеній на рис. 1, за винятком того, що замість термопари в оболонці з ізольованим вимірювальним спаєм (рис. 1, позиція 1) було застосовано термопару з неізольованими проводами з діаметром дроту 1,2 мм.

Пластинчасті термометри були орієнтовані таким чином, щоб їх бік «А» було повернуто до підлоги печі.

У печі створювали стандартний температурний режим таким чином, щоб найбільш наближеними до значень $T_s$, визначених за формулою (1), для тривалості вогневого впливу в інтервалі $0 < t \leq 5$ були покази стрижневих термопар, а для більшої тривалості – покази промислових пластинчастих термометрів.

Під час вогневого впливу вимірювали температуру в печі із застосуванням всіх наведених вище стрижневих термопар і пластинчастих термометрів. За результатами цього вимірювання для кожного проміжку часу вогневого впливу визначали середні значення показів $T_{na}$, отриманих двома стрижневими термопарами ($T_{na,1}$, $T_{na,2}$), середні значення показів $T_{en}$, отриманих двома промисловими пластинчастими термометрами ($T_{en,1}$, $T_{en,2}$), і середні значення показів $T_{en,la}$, отриманих двома модифікованими пластинчастими термометрами ($T_{en,mod,1}$, $T_{en,\ mod,2}$). Для кожного проміжку часу вогневого впливу визначали різницю між значеннями температури в печі, отриманими із застосуванням пластинчастих термометрів і стрижневих термопар, за такими формулами:

$$\delta_{T,en} = 100\ (T_{en} - T_{na})/\ T_{na}; \qquad (2)$$

$$\delta_{T,en,mod} = 100\ (T_{en,\ mod} - T_{na})/\ T_{na}, \qquad (3)$$

де $\delta_{T,en}$ – різниця між середніми значеннями показів температури в печі, отриманими із застосуванням промислових пластинчастих термометрів і стрижневих термопар, %;

$\delta_{T,en,mod}$ – різниця між середніми значеннями показів температури в печі, отриманими із застосуванням модифікованих пластинчастих термометрів і стрижневих термопар, %.

За отриманими даними щодо різниці $\delta_{T,en}$ і $\delta_{T,en,mod}$ оцінювали змінення проміжків часу до досягнення граничних станів будівельних конструкцій і виробів за вогнестійкістю під час використання пластинчастих термометрів замість стрижневих термопар.

**Виклад основного матеріалу.** Визначення різниці між показами пластинчастих термометрів і стрижневих термопар проведено для двох значень тривалості вогневого впливу за стандартного температурного режиму в печі, які становлять 30 хв і 90 хв. У першому досліді, тривалістю 30 хв, піч оснащували залізобетонним покриттям із класом вогнестійкості REI 30 без вогнезахисного облицювання, в другому досліді, тривалістю 90 хв, – залізобетонним

покриттям із класом вогнестійкості REI 90 з вогнезахисним облицюванням.

Результати вимірювання температури в печі та визначення різниці $\delta_{T,en}$ і $\delta_{T,en,mod}$ між пластинчастими термометрами і стрижневими термопарами для цих дослідів наведено в табл. 1, 2 і на рис. 2, 3. У цих таблицях також надано дані щодо відхилення ($T_{en} - T_s$) показів промислових пластинчастих термометрів від стандартної температури і відхилення ($d_b$) площі під кривою температури $T_{en}(t)$ від площі під кривою стандартного температурного режиму $T_s(t)$ [2].

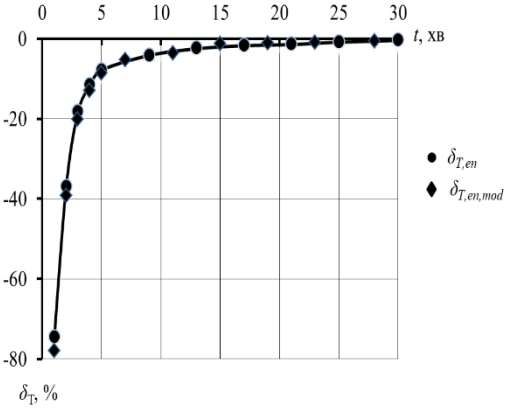



*Рисунок 2* – Залежність різниці між показами пластинчастих термометрів і стрижневих термопар від проміжку часу вогневого впливу для досліду № 1

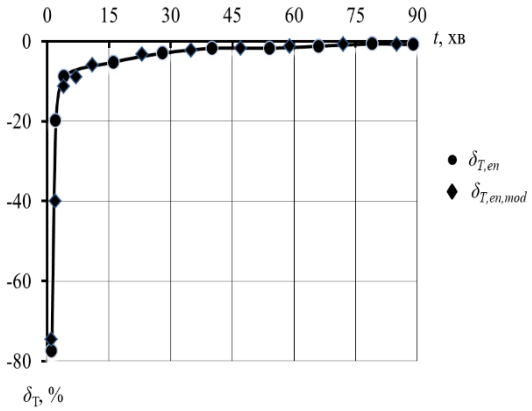



*Рисунок 3* – Залежність різниці між показами пластинчастих термометрів і стрижневих термопар від проміжку часу вогневого впливу для досліду № 2

*Джерело:* розроблено авторами

*Таблиця 1* – Дані щодо температури в печі та різниці між показами пластинчастих термометрів і стрижневих термопар, отримані в досліді № 1

| Проміжок часу $t$, хв | Експериментальні дані, °С | | | | | | Середня температура, °С | | | Відхилення | | Різниця, % | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $T_{na,1}$ | $T_{na,2}$ | $T_{en,1}$ | $T_{en,2}$ | $T_{en,mod,1}$ | $T_{en,mod,2}$ | $T_{na}$ | $T_{en}$ | $T_{en,mod}$ | $T_{en} - T_s$, °С | $d_b$, % | $\delta_{T,en}$ | $\delta_{T,en,mod}$ |
| 0 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | -10 | – | 0 | 0 |
| 1 | 547 | 465 | 124 | 135 | 94 | 130 | 506 | 130 | 112 | -220 | -62,92 | -74,41 | -77,87 |
| 2 | 593 | 534 | 344 | 368 | 328 | 357 | 564 | 356 | 343 | -89 | -19,91 | -36,82 | -39,22 |
| 3 | 608 | 552 | 471 | 479 | 459 | 468 | 580 | 475 | 464 | -27 | -5,43 | -18,10 | -20,09 |
| 4 | 649 | 591 | 548 | 549 | 536 | 544 | 620 | 549 | 540 | 5 | 0,85 | -11,53 | -12,90 |
| 5 | 662 | 607 | 586 | 585 | 576 | 584 | 635 | 586 | 580 | 9 | 1,58 | -7,72 | -8,59 |
| 6 | 673 | 618 | 608 | 607 | 597 | 607 | 646 | 608 | 602 | 4 | 0,73 | -5,89 | -6,74 |
| 7 | 680 | 626 | 623 | 623 | 613 | 624 | 653 | 623 | 619 | -3 | -0,44 | -4,59 | -5,28 |
| 8 | 689 | 636 | 636 | 636 | 627 | 638 | 663 | 636 | 633 | -9 | -1,46 | -4,00 | -4,53 |
| 9 | 708 | 657 | 655 | 655 | 647 | 658 | 683 | 655 | 653 | -8 | -1,18 | -4,03 | -4,40 |
| 10 | 732 | 678 | 670 | 670 | 662 | 675 | 705 | 670 | 669 | -8 | -1,24 | -4,96 | -5,18 |
| 11 | 748 | 698 | 698 | 698 | 691 | 704 | 723 | 698 | 698 | 5 | 0,79 | -3,46 | -3,53 |
| 12 | 759 | 707 | 715 | 715 | 708 | 720 | 733 | 715 | 714 | 10 | 1,36 | -2,46 | -2,59 |
| 13 | 770 | 721 | 728 | 728 | 721 | 733 | 746 | 728 | 727 | 11 | 1,49 | -2,35 | -2,48 |
| 14 | 778 | 732 | 739 | 739 | 732 | 745 | 755 | 739 | 739 | 11 | 1,47 | -2,12 | -2,19 |
| 15 | 782 | 734 | 748 | 748 | 742 | 754 | 758 | 748 | 748 | 9 | 1,28 | -1,32 | -1,32 |
| 20 | 810 | 768 | 779 | 780 | 775 | 786 | 789 | 780 | 781 | -2 | -0,24 | -1,20 | -1,08 |
| 25 | 841 | 800 | 814 | 815 | 811 | 820 | 821 | 815 | 816 | 0 | -0,01 | -0,73 | -0,61 |
| 30 | 869 | 830 | 846 | 848 | 846 | 853 | 850 | 847 | 850 | 5 | 0,62 | -0,29 | 0,00 |

*Джерело:* розроблено авторами

*Таблиця 2* – Дані щодо температури в печі та різниці між показами пластинчастих термометрів і стрижневих термопар, отримані в досліді № 2

| Проміжок часу $t$, хв | Експериментальні дані, °С | | | | | | Середня температура, °С | | | Відхилення | | Різниця, % | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $T_{na,1}$ | $T_{na,2}$ | $T_{en,1}$ | $T_{en,2}$ | $T_{en,\ mod,1}$ | $T_{en,\ mod,2}$ | $T_{na}$ | $T_{en}$ | $T_{en,mod}$ | $T_{en} - T_s$, °С | $d_b$, % | $\delta_{T,en}$ | $\delta_{T,en,mod}$ |
| 0 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | -4 | – | 0 | 0 |
| 1 | 533 | 486 | 101 | 129 | 118 | 141 | 510 | 115 | 130 | -234 | -67,07 | -77,43 | -74,58 |
| 2 | 621 | 596 | 332 | 371 | 352 | 378 | 609 | 352 | 365 | -93 | -20,92 | -42,24 | -40,02 |
| 3 | 642 | 620 | 494 | 517 | 499 | 522 | 631 | 506 | 511 | 3 | 0,64 | -19,89 | -19,10 |
| 4 | 658 | 634 | 564 | 579 | 563 | 584 | 646 | 572 | 574 | 28 | 5,08 | -11,53 | -11,22 |
| 5 | 657 | 636 | 584 | 595 | 579 | 600 | 647 | 590 | 590 | 13 | 2,27 | -8,82 | -8,82 |
| 6 | 670 | 642 | 597 | 609 | 592 | 614 | 656 | 603 | 603 | 0 | -0,02 | -8,08 | -8,08 |
| 7 | 692 | 666 | 610 | 624 | 607 | 629 | 679 | 617 | 618 | -9 | -1,40 | -9,13 | -8,98 |
| 8 | 714 | 686 | 634 | 649 | 632 | 654 | 700 | 642 | 643 | -4 | -0,61 | -8,36 | -8,14 |
| 9 | 729 | 705 | 655 | 671 | 653 | 675 | 717 | 663 | 664 | 0 | 0,02 | -7,53 | -7,39 |
| 10 | 740 | 713 | 670 | 685 | 669 | 690 | 727 | 678 | 680 | -1 | -0,14 | -6,74 | -6,47 |
| 11 | 748 | 723 | 684 | 698 | 682 | 702 | 736 | 691 | 692 | -2 | -0,22 | -6,05 | -5,91 |
| 12 | 757 | 732 | 696 | 710 | 694 | 714 | 745 | 703 | 704 | -2 | -0,35 | -5,57 | -5,44 |
| 13 | 767 | 743 | 706 | 720 | 704 | 723 | 755 | 713 | 714 | -4 | -0,60 | -5,56 | -5,50 |
| 14 | 774 | 752 | 716 | 730 | 715 | 733 | 763 | 723 | 724 | -5 | -0,73 | -5,24 | -5,11 |
| 15 | 781 | 761 | 726 | 740 | 725 | 742 | 771 | 733 | 734 | -6 | -0,75 | -4,93 | -4,86 |
| 20 | 831 | 809 | 779 | 793 | 779 | 796 | 820 | 786 | 788 | 5 | 0,59 | -4,15 | -3,96 |
| 25 | 864 | 840 | 819 | 831 | 819 | 834 | 852 | 825 | 827 | 10 | 1,28 | -3,17 | -2,99 |
| 30 | 885 | 862 | 843 | 855 | 844 | 858 | 874 | 849 | 851 | 7 | 0,86 | -2,80 | -2,58 |
| 40 | 910 | 890 | 876 | 887 | 877 | 889 | 900 | 882 | 883 | -3 | -0,37 | -2,06 | -1,89 |
| 50 | 944 | 922 | 912 | 922 | 914 | 926 | 933 | 917 | 920 | -1 | -0,12 | -1,71 | -1,39 |
| 60 | 973 | 952 | 944 | 953 | 945 | 957 | 963 | 949 | 951 | 3 | 0,33 | -1,45 | -1,19 |
| 70 | 994 | 973 | 969 | 979 | 971 | 980 | 984 | 974 | 976 | 6 | 0,58 | -0,97 | -0,81 |
| 80 | 1000 | 981 | 979 | 989 | 982 | 990 | 991 | 984 | 986 | -4 | -0,44 | -0,66 | -0,45 |
| 90 | 1021 | 1002 | 998 | 1008 | 1002 | 1009 | 1012 | 1003 | 1006 | -3 | -0,30 | -0,84 | -0,59 |

*Джерело:* розроблено авторами

Із аналізу отриманих експериментальних даних випливає таке. Відхилення ($T_{en} - T_s$) показів промислових пластинчастих термометрів від стандартної температури $T_s$ є найбільшим для проміжку часу вогневого впливу, який становить 1 хв. Для дослідів № 1 і № 2 це найбільше значення відповідно становить –220 °С і – 234 °С. З підвищенням тривалості вогневого впливу значення цього відхилення зменшується і для $t > 5$ хв відхилення ($T_{en} - T_s$) не перевищує 11 °С і 10 °С відповідно для дослідів № 1 і № 2. Значення відхилення $d_b$ не перевищують допустимі величини, які встановлені в EN 1363-1:2020 для тривалості вогневого впливу більшої ніж 5 хв. Найбільші значення цього відхилення для $t > 5$ хв становлять 1,49 % і –1,40 % відповідно для дослідів № 1 і № 2.

Стосовно різниці між показами пластинчастих термометрів і стрижневих термопар під час створення стандартного температурного режиму в печі слід зазначити, що з підвищенням тривалості вогневого впливу ця різниця значно зменшується (рис. 2, 3). Для дослідів № 1 та № 2 найбільші значення різниці $\delta_{T,en}$ й $\delta_{T,en,mod}$ відповідно становлять –77,9 % і – 77,4 % і мають місце для проміжку часу вогневого впливу, який дорівнює 1 хв. Для тривалості вогневого впливу в інтервалі $5 < t \leq 10$ різниця $\delta_{T,en}$ і $\delta_{T,en,mod}$ не перевищує –6,74 % і –9,13 %, відповідно для дослідів № 1 і № 2. Для інтервалу $10 < t \leq 30$ різниця $\delta_{T,en}$ і $\delta_{T,en,mod}$ відповідно не перевищує –3,53 % і –6,05 %. Для

$30 < t \leq 60$ (для досліду № 2) різниця $\delta_{T,en}$ і $\delta_{T,en,mod}$ не перевищує –2,06 %, а для $60 < t \leq 90$ – становить від –0,45 % до –0,97 %.

Різниця між показами промислових і модифікованих пластинчастих термометрів є незначною. Максимальне значення цієї різниці має місце для тривалості вогневого впливу 1 хв і становить 3,47 % і 2,85 % відповідно для дослідів № 1 і № 2. Більша кількість значень показів модифікованих пластинчастих термометрів знаходиться між показами промислових пластинчастих термометрів і стрижневих термопар ($T_{en} < T_{en,mod} < T_{na}$). Це свідчить про можливість застосування під час створення стандартного температурного режиму в печі модифікованих пластинчастих термометрів.

Як випливає з отриманих результатів (табл. 1, 2 та рис. 2, 3), закономірним є наявність в інтервалі проміжку часу вогневого впливу до 5 хв значної різниці між показами пластинчастих термометрів і стрижневих термопар. Це пов'язано з більшою тепловою інерцією пластинчастих термометрів порівняно зі стрижневими термопарами через застосування в їх конструкції смужки зі сплаву нікелю товщиною (0,7 ± 0,1) мм (рис. 1, позиція 5) і відмінностями в їх конструкціях. Вимірювальний спай стрижневих термопар безпосередньо піддається тепловому впливу від газового середовища в печі всією його поверхнею. Вимірювальний спай термопари у пластинчастих термометрах не піддається тепловому впливу безпосередньо від газового середовища в печі. Частина поверхні цього спаю контактує зі смужкою із сплаву нікелю, яка безпосередньо піддається тепловому впливу від газового середовища в печі (рис. 1, позиція 6 – бік «А»), інша поверхня вимірювального спаю контактує з теплоізоляційним матеріалом (рис. 1, позиція 4). Це призводить до такого. Після вмикання пальників у печі на перших хвилинах вогневого впливу для забезпечення нормованих значень температури $T_s$ (зокрема, для проміжку часу 1 хв величина цієї температури становить 349 °С) відбувається інтенсивне підвищення температури газового середовища в печі. Через наявність теплової інерції значення температури вимірювального спаю термопари менші, ніж реальні (дійсні) величини температури газового середовища в печі. Водночас різниця між показами термопар і дійсними значеннями температури газового середовища в печі більша для пластинчастих термометрів, ніж для стрижневих термопар. З підвищенням тривалості вогневого впливу через суттєве зниження швидкості підвищення температури газового середовища в печі величина цієї різниці значно зменшується. Також значно зменшується різниця між показами пластинчастих термометрів і стрижневих термопар. Для проміжку часу, більшого ніж 5 хв, ця різниця не перевищує 9,13 %, а для тривалості вогневого впливу 30 хв і 90 хв вона відповідно становить – 2,8 % і –0,84 % (табл. 2).

Слід зазначити, що застосування різних засобів вимірювання температури в печі призводить до різної інтенсивності теплового впливу на зразки будівельних конструкцій і виробів, що підлягають випробуванню на вогнестійкість. Основним параметром, який визначає інтенсивність цього теплового впливу, є температура газового середовища в печі. У разі створення стандартного температурного режиму із застосуванням пластинчастих термометрів, через те, що різниця між показами термопар і дійсними значеннями температури газового середовища в печі більша для пластинчастих термометрів, ніж для стрижневих термопар, інтенсивність теплового впливу на зразки конструкцій більша, ніж під час використання стрижневих термопар. Найбільша різниця між величинами інтенсивності теплового впливу на зразки конструкцій під час випробування на вогнестійкість із застосуванням пластинчастих термометрів і стрижневих термопар має місце для інтервалу $0 < t \leq 5$. Для іншої тривалості вогневого впливу ця різниця незначна.

З цього випливає, що під час застосування для вимірювання температури в печі пластинчастих термометрів можна прогнозувати отримання менших проміжків часу до досягнення граничних станів будівельних конструкцій і виробів за вогнестійкістю, ніж під час використання стрижневих термопар. Результати випробувань на вогнестійкість, отримані із застосуванням пластинчастих термометрів, є дійсними для випробувань із використанням стрижневих термопар, а не навпаки. Відмінність між результатами випробувань на вогнестійкість, отриманими із застосуванням пластинчастих термометрів і стрижневих термопар, може бути найбільшою для будівельних конструкцій і виробів з мінімальними класами вогнестійкості R 15, E 15, EI 15. EW 15, REI 15 [15]. З підвищенням проміжку часу класифікації за вогнестійкістю ця відмінність суттєво зменшується.

Наведене вище оцінювання збіжності результатів випробувань будівельних конструкцій і виробів на вогнестійкість, отриманих із застосуванням стрижневих термопар і пластинчастих термометрів, може вважатися за доцільне з практичного погляду. Це дає змогу оцінити прийнятність результатів випробувань, отриманих згідно з ДСТУ Б В.1.1-4-98* [1] (із застосуванням стрижневих термопар), для проведення класифікації за вогнестійкістю за EN 13501- 2:2016 [15] для будівельних конструкцій і виробів, які піддавали цим випробуванням. Відповідно до цього європейського класифікаційного стандарту визначення класів за вогнестійкістю виконують за результатами випробувань, отриманими за EN 1363-1:2020 [2] (із застосуванням пластинчастих термометрів). Однак варто зауважити, що під час проведеного дослідження з'ясовано проміжок часу класифікації за вогнестійкістю, для якого відмінність між результатами випробувань на вогнестійкість, отриманими із застосуванням пластинчастих термометрів і стрижневих термопар, є найбільшою, але кількісної оцінки цієї відмінності не проведено. Крім того, розглядали засоби вимірювання температури в печі, які розташовували на певній відстані від горизонтальної будівельної конструкції (покриття печі), а у разі їхнього встановлення біля вертикальної будівельної конструкції не можна виключати можливість отримання інших результатів. Така невизначеність накладає обмеження на використання отриманих результатів, що може трактуватися як недолік проведеного дослідження. Неможливість зняти зазначені обмеження в рамках цього дослідження обґрунтовує напрями подальших розвідок, які, зокрема, можуть бути орієнтовані на проведення кількісної оцінки відмінності між даними щодо проміжків часу настання граничних станів за вогнестійкістю горизонтальних і вертикальних будівельних конструкцій та виробів, отриманими під час випробування із застосуванням пластинчастих термометрів і стрижневих термопар.

**Висновки та напрями подальших досліджень.** Визначено дані щодо різниці між показами пластинчастих термометрів і стрижневих термопар у разі створення стандартного температурного режиму в печі під час випробування будівельних конструкцій і виробів на вогнестійкість. Виявлено, що покази пластинчастих термометрів менші, ніж стрижневих термопар, і найбільші значення різниці між ними, які складають десятки відсотків, фіксуються у перші п'ять хвилин вогневого впливу, а з підвищенням цієї тривалості зазначена різниця значно зменшується – до декількох відсотків. Максимальна величина різниці становить – 77,9 % і має місце для проміжку часу вогневого впливу, який дорівнює 1 хв. Для тривалості вогневого впливу в інтервалах $5 < t \le 10$, $10 < t \le 30$, $60 < t \le 90$ різниця не перевищує –9,13 %, –6,05 % і –0,97 % відповідно.

Доведено, що під час створення стандартного температурного режиму в печі різниця між показами промислових пластинчастих термометрів і

модифікованих пластинчастих термометрів, в яких замість термопари в оболонці з ізольованим вимірювальним спаєм застосовано термопару з неізольованими проводами з діаметром дроту 1,2 мм, є незначною (не перевищує 3,47 %), що свідчить про можливість застосування таких модифікованих пластинчастих термометрів для вимірювання температури в печі.

Встановлено, що у разі застосування для вимірювання температури в печі пластинчастих термометрів можна прогнозувати отримання менших проміжків часу до досягнення граничних станів конструкцій за вогнестійкістю, ніж під час використання стрижневих термопар. Результати випробувань на вогнестійкість, отримані із застосуванням пластинчастих термометрів, є дійсними для випробувань із використанням стрижневих термопар, а не навпаки. Відмінність між результатами випробувань на вогнестійкість, отриманими із застосуванням пластинчастих термометрів і стрижневих термопар, може бути найбільшою для будівельних конструкцій і виробів з нормованим проміжком часу класифікації за вогнестійкістю, який становить 15 хвилин.

Визначено напрями подальших досліджень, які орієнтовані на проведення кількісної оцінки відмінності між даними щодо проміжків часу настання граничних станів за вогнестійкістю горизонтальних і вертикальних будівельних конструкцій та виробів, отриманими під час випробування із застосуванням пластинчастих термометрів і стрижневих термопар.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ


1. ДСТУ Б В.1.1-4-98* Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги. [Чинний від 2006-01-01]. Київ : Держбуд України, 2005. 19 с.
2. EN 1363-1:2020 Fire resistance tests. Part 1 : General Requirements. European Committee for Standardization. Cen-Cenelec Management Centre : Rue de la Science 23, B-1040 Brussels. 2020 CEN. 54 p.
3. Новак С., Дрідж В., Добростан О. Вплив параметрів системи вогнезахисту на вогнестійкість сталевих конструкцій. *Науковий вісник : Цивільний захист та пожежна безпека.* 2021. № 1(11). С. 64–74.
4. Silva D., A. Bilotta A., Nigro E. Experimental investigation on steel elements protected with intumescent coating. *Construction and Building Materials.* 2019. P. 232–244. Doi : https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.223.
5. Qing Xu, Guo-Qiang Li, Jian Jiang, Yong C. Wang. Experimental study of the influence of topcoat on insulation performance of intumescent coatings for steel structures. *Fire Safety Journal.* 2018. P. 25–38. Doi : https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.08.006.
6. Novak S., Drizhd V., Dobrostan O. Thermal state of steel structures with a combined fire protection system under conditions of fire exposure. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2020. Vol. 3/10 (105). P. 17–25.
7. Wei-Yong Wang, Guo-Qiang Li. Behavior of steel columns in a fire with partial damage to fire protection. *Journal of Constructional Steel Research. 2009.* P. 1392–1400. Doi : https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2009.01.004.
8. Новак С., Дрідж В., Добростан О. Вогнестійкість сталевих повітроводів з комбінованою системою вогнезахисту. *Науковий вісник : Цивільний захист та пожежна безпека.* 2020. № 1 (9). С. 52–65.
9. Новак С., Дрідж В., Добростан О., Іллюченко П. Дослідження вогнестійкості кабельних проходок із застосуванням реактивного вогнезахисного матеріалу «Ендотерм ХТ-150». *Науковий вісник : Цивільний захист та пожежна безпека.* 2019. № 2(8). С. 3–14.
10. ENV 1363-3:1998 Fire resistance tests. Part 3 : Verification of furnace performance. European Committee for Standardization. Central Secretariat : rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 1998 CEN. 20 p.
11. Sultan M. A., Benichou N., Min B. Y. Heat exposure in fire resistance furnaces : full-scale vs intermediate-scale. *Fire and Materials 2003 International Conference,* San Francisco, Jan. 27–29 2003. P. 43–53.
12. Sultan, M. A. Performance of Different Temperature Sensors in Standard Fire Resistance Test Furnaces. *Fire Technology*. 2010. Vol. 46 (4). P. 853–881. Doi : 10.1007/s10694-010-0166-9.
13. ASTM E119:2020 Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials.
14. Van De Leur P., Twiit L. Thermal Exposure in Fire Resistance Furnaces. *Fire Safety Science.* № 6. 2000. P. 1087–1098. Doi :10.3801/IAFSS.FSS.6-1087.
15. EN 13501-2:2016 Fire classification of construction products and building elements. Part 2 : Classification using data from fire resistance tests, excluding ventilation services. Cen-Cenelec Management Centre : Rue de la Science 23, B-1040 Brussels. 2016 CEN. 79 p.


## REFERENCES


1. DSTU B V.1.1-4-98*. Zakhyst vid pozhezhi. Budivelni konstruktsii. Metody vyprobuvan na vohnestiikist. Zahalni vymohy (2005). [Fire protection. Building constructions. Test methods for firefighters. General requirement]. Kyiv : Derzhbud Ukrainy.19 p. [In Ukrainian].
2. EN 1363-1:2020. Fire resistance tests. Part 1 : General Requirements. European Committee for Standardization. Cen-Cenelec Management Centre : Rue de la Science 23, B-1040 Brussels. 2020 CEN. 54 p. [in English].

3. Novak, S. V., Drizhd, V. L, Dobrostan, O. V. (2021). Vplyv parametriv systemy vognezaxystu na vognestijkist stalevyh konstrukcij. [Influence of fire protection system parameters on fire resistance of steel structures]. Naukovyi visnyk : Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka. 2021. № 1(11). S. 64–74. [In Ukrainian].
4. Silva, D., Bilotta, A., Nigro, E. (2019). Experimental investigation on steel elements protected with intumescent coating. Construction and Building Materials. 2019. P. 232–244. Doi : https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.223. [in English].
5. Qing Xu, Guo-Qiang Li, Jian Jiang, Yong C. Wang. (2018). Experimental study of the influence of topcoat on insulation performance of intumescent coatings for steel structures. Fire Safety Journal. 2018. P. 25–38. Doi : https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.08.006. [in English].
6. Novak, S., Drizhd, V., Dobrostan, O. (2020). Thermal state of steel structures with a combined fire protection system under conditions of fire exposure. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Vol. 3/10 (105). P. 17–25. [in English].
7. Wei-Yong, Wang, Guo-Qiang, Li. (2009). Behavior of steel columns in a fire with partial damage to fire protection. Journal of Constructional Steel Research. 2009. P. 1392–1400. Doi : https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2009.01.004. [in English].
8. Novak, S., Drizhd, V., Dobrostan, O. (2020). Vognestijkist stalevyh povitrovodiv z kombinovanoyu systemoyu vognezaxystu. [Fire resistance of steel air ducts with combined fire protection system]. Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka. 2020. № 1(9). S. 52–65. [In Ukrainian].
9. Novak, S., Drizhd, V., Dobrostan, O., Illyuchenko P. (2019). Doslidzhennya vognestijkosti kabelnyh prohodok iz zastosuvannyam reaktyvnogo vognezahysnogo materialu «Endoterm XT-150». [Research of fire resistance of cable punches with the application of reactive fire protection material «Endotherm HT-150»]. Naukovyi visnyk : Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka. 2019. № 2(8). S. 3–14. [In Ukrainian].
10. ENV 1363-3:1998. Fire resistance tests. Part 3 : Verification of furnace performance. European Committee for Standardization. Central Secretariat: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 1998 CEN. 20 p. [in English].
11. Sultan, M. A., Benichou, N., Min, B.Y. (2003). Heat exposure in fire resistance furnaces: full-scale vs intermediate-scale. Fire and Materials 2003 International Conference, San Francisco, Jan. 27–29 2003. P. 43–53. [in English].
12. Sultan, M. A. (2010). Performance of Different Temperature Sensors in Standard Fire Resistance Test Furnaces. Fire Technology. 2010. Vol. 46 (4). P. 853–881. Doi : 10.1007/s10694-010-0166-9. [in English].
13. ASTM E119:2020. Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials. 2020. 36 p. [in English].
14. Van De Leur P., Twiit L. (2000). Thermal Exposure in Fire Resistance Furnaces. Fire Safety Science. № 6. 2000. P. 1087–1098. Doi :10.3801/IAFSS.FSS.6-1087. [in English].
15. EN 13501-2:2016. Fire classification of construction products and building elements. Part 2 : Classification using data from fire resistance tests, excluding ventilation services. Cen-Cenelec Management Centre: Rue de la Science 23, B-1040 Brussels. 2016 CEN. 79 p. [in English].

## INFLUENCE OF PARAMETERS OF MEANS OF TEMPERATURE MEASUREMENT IN THE FURNACE ON THE RESULTS OF FIRE RESISTANCE TESTS OF BUILDING STRUCTURES AND PRODUCTS

*S. Novak[1], O. Dobrostan[1], O. Abramov[2]*
*[1]Institute of Public Administration and Research in Civil Protection, Ukraine*
*[2]Test Center of TEST LLC, Ukraine*

KEYWORDS:

building structures; fire resistance; tests; temperature measuring instruments; plate thermometers; rod thermocouples; standard temperature regime

ANNOTATION

Due to the differences in the design of measuring instruments used according to national and European standards for measuring the temperature in the furnace, it is impossible to exclude inconsistencies in the creation of the same thermal effect on samples of test structures, which may affect the fire resistance test results of building structures and products, which are carried out according to national and European principles. This uncertainty led to a study of the influence of the parameters of the means of measuring the temperature in the furnace on the results of fire resistance tests of building structures and products, the results of which are presented in this article. The study aimed to assess the convergence of the results of fire resistance tests of building structures and products, obtained using different means of measuring the temperature in the furnace (rod thermocouples and plate thermometers), the parameters of which are given in national and European standards (DSTU B B.1.1-4-98* and EN 1363-1:2020). To achieve this goal, the problem of determining the difference between the readings of plate thermometers and rod thermocouples under fire conditions at standard temperature in the furnace and assess the change in time intervals to reach the fire resistance limit states of building structures and products for when used to measure plate temperature thermometers instead of rod thermocouples. It is shown that the highest values of the above difference, which is tens of percent, occur in the first five minutes of fire, and with increasing duration, this difference decreases significantly to several percent. It is established that when using plate thermometers to measure the temperature in the furnace, it is possible to predict shorter intervals before reaching the fire resistance limit states of structures in terms than when using rod thermocouples. The difference between the results of fire resistance tests obtained using plate thermometers and rod thermocouples may be the largest for building structures and products with a normalized period of time of classification for fire resistance, which is 15 minutes.

*УДК 614.841*

# АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ РОЗРОБЛЕННЯ ВИМОГ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ ЗАРЯДНИХ СТАНЦІЙ ДЛЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

*https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.1.15-23*

Ніжник В. В., ORCID iD 0000-0003-3370-9027
Сізіков О. О.,ORCID iD 0000-0002-7861-3144
Фещук Ю. Л. ORCID iD 0000-0003-4328-8473
Балло Я. В., ORCID iD 0000-0002-9044-1293
Жихарєв 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

*Надійшла до редакції: 12.04.2022*
*Пройшла рецензування: 27.04.2022*

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

система зарядки електромобілів; зарядні станції; протипожежний захист; планування машиномісць; електромобіль; вимоги до проєктування

АНОТАЦІЯ

Наведено аналіз даних щодо питань нормативно-правового забезпечення пожежної безпеки під час влаштування зарядних станцій для електромобілів як на відкритих автостоянках, так і в гаражах (паркінгах). Розглянуто проблемні питання чинних нормативно-правових актів в Україні та виявлено недоліки у сучасних вимогах до комплексу протипожежного захисту як складової інфраструктури зарядних станцій для електромобілів. Проведено аналітичні дослідження причин та наслідків пожеж, які відбувалися на зарядних станціях та в електромобілях під час їх заряджання. Виявлено необхідність обґрунтування вимог до планування машино-місць із системою зарядки для електромобілів. Окреслено проблему планування машино-місць із системою зарядки для електромобілів на території відкритих автостоянок, закритих паркінгів, а також місць, які розташовані на території автозаправних станцій. Наведено приклад можливості застосування програмного комплексу Fire Dynamics Simulator для комп'ютерного моделювання сценаріїв поширення небезпечних чинників пожежі та їх негативного впливу на суміжні об'єкти інфраструктури. Опрацьовано питання облаштування місць зарядки електромобілів окремими типами систем протипожежного захисту та визначення необхідних первинних засобів пожежогасіння для забезпечення пожежної безпеки об'єкта захисту. Наголошено на удосконаленні методів гасіння електромобілів, станцій для заряджання електромобілів та запобігання їх повторному займанню. Наведено аналіз причин потенційних загроз під час гасіння електромобілів для пожежно-рятувальних підрозділів. Визначено перелік нормативно-правових актів, які потребують удосконалення, а також обґрунтовано необхідність розроблення національного стандарту, в якому буде встановлено основні вимоги пожежної безпеки машино-місць для заряджання електромобілів під час їх проєктування.

**Постановка проблеми.** За інформацією Мінрегіону, в 2021 році в Україні зарядна мережа електромобілів складала 3 244 одиниці (в тому числі 7 661 терміналів), водночас швидкісних терміналів на зарядних станціях для електромобілів – 1 835 одиниць (потужність понад 22 КВт), а всіх інших (звичайних) – 5 826 (потужність до 22 КВт) [1].

Згідно з аналізом даних МВС станом на 1 січня 2022 року в Україні зареєстровано 33 522 електромобілі, тобто на кожний термінал зарядної станції припадає близько чотирьох електромобілів (для порівняння: в Нідерландах також на один термінал зарядної станції припадає чотири автомобілі, а в Польщі – сім).

Таким чином, в Україні, як і в усьому світі, спостерігається стійка тенденція до суттєвого збільшення кількості електромобілів, що відповідає стратегії світового співтовариства щодо запобігання глобальному кліматичному потеплінню.

Відповідно до [2] Кабінету Міністрів України доручено забезпечити ухвалення нормативно-правових актів, необхідних для реалізації положень цього Закону. На сьогодні в нормативних документах [3–4] частково передбачено окремі заходи щодо проєктування зарядних станцій для електромобілів, але в них не містяться важливі вимоги протипожежного захисту щодо:

- планування машино-місць, обладнаних системами зарядки електромобілів на автостоянках, гаражах (паркінгах) та електрозарядних станціях;
- вимог до мінімальних протипожежних відстаней від машино-місць із системами зарядки для електромобілів до суміжних машино-місць автомобілів із двигунами внутрішнього згоряння, та машино-місць із системами зарядки до об’єктів різного функціонального призначення;
- оснащення зарядних станцій для електромобілів системами протипожежного захисту та первинними засобами пожежогасіння;
- забезпечення безпечної евакуації людей у разі пожежі з гаражів (паркінгів);
- можливостей пожежно-рятувальних підрозділів ефективно виконувати пожежно-рятувальні роботи та діяти з прийнятним рівнем безпеки.

Враховуючи положення Закону [2], а також через брак у вітчизняній нормативній базі вимог до протипожежного захисту систем зарядки електромобілів створюються передумови щодо необхідності проведення наукових досліджень з обґрунтування та подальшого унормування комплексу протипожежного захисту як складової інфраструктури зарядних станцій для електромобілів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Згідно з аналізом статистичних даних про пожежі на зарядних станціях для електромобілів в Україні та світі, а також дослідженнями їх причин і наслідків найбільш поширеними були загоряння електромобіля внаслідок використання неоригінальних заряджаючих пристроїв та порушення технічних правил під час зарядки електромобіля. Окрім цього, траплялися випадки, коли зарядний пристрій не вимикався автоматично під час перегріву і, таким чином, було пошкоджено ізоляцію, що спричинило коротке замикання, а кабель подовжувача був змотаний в кільця, що заборонено правилами з техніки безпеки. Також відбувалося займання у просторі електромобіля, після чого пожежа швидко його охоплювала та фактично знищувала ще до прибуття пожежно-рятувальних підрозділів.

Зважаючи на дослідження причин пожеж, зокрема з’ясовано, що здебільшого електромобілі потрапляли до України уже вживаними та відповідно без належного технічного обслуговування й сервісного супроводу виробника. Крім того, певна кількість електромобілів, які експлуатуються в Україні, є відновленими після дорожньо-транспортних пригод (аварій), і їх ремонт відбувався на неофіційних технічних станціях без нагляду виробника, а відповідно зробити об’єктивний офіційний висновок про причини пожежі та відмову того чи іншого компонента конструкції електромобіля фактично неможливо [5–6].

Дослідження даних про пожежі на зарядних станціях для електромобілів за кордоном показало, що у період 2019– 2021 рр. в усьому світі відбулося близько 1 500 пожеж. Їх детальний аналіз в

Європі та США проводить Національне управління безпеки дорожнього руху США (NHTSA) Міністерства транспорту США, щоб встановити, чи є літій-іонні тягові акумулятори у електричних транспортних засобах джерелом підвищеної пожежної небезпеки, чи небезпека більше походить від самих станцій зарядки. Окрім цього, NHTSA з'ясовувало, чи можуть тягові акумулятори електромобіля бути джерелом пожежі не тільки під час заряджання, а й у разі якщо транспортні засоби потрапляють в аварію, в тому числі через автомобілі, котрі з якихось причин втратили керування та в'їхали в електромобіль, що знаходиться на зарядці. Зокрема, зафіксовано не менше шести загорянь через ці причини [7].

Одна з найбільш небезпечних пожеж, яка завдала значних збитків, виникла 7 січня 2020 р. внаслідок загоряння електромобіля в багатоповерховому паркінгу, розташованому поруч із терміналом аеропорту норвезького міста Ставангер. Було евакуйовано тисячі людей. Пожежу ліквідували протягом 47 годин із залученням 60–70 осіб з особового складу пожежних підрозділів. Через пошкодження конструкцій паркінгу та наявність токсичних газів і диму від акумуляторних батарей електромобілів був ускладнений вхід у будівлю, внаслідок чого пожежу загасили за такий тривалий час. Було знищено близько 300 автомобілів і завдано матеріальних збитків на десятки мільйонів доларів [8].

Крім того, зафіксовано випадки недотримання вимог щодо заземлення зарядних станцій та порушення правил підключення зарядних пристроїв до електромобілів, що також спричинило пожежі. Зокрема, слід зазначити про випадки щодо неможливості оперативно дистанційно вимкнути зарядну станцію під час виявлення її несправності.

На виникнення пожеж під час зарядки електромобілів також впливає навколишнє середовище, а саме: неправильне планування машино-місць для зарядки електромобілів, що в подальшому може спричинити підтоплення електромобіля чи зарядної станції та призвести до замикання електропроводки й пошкодження електромобіля [9].

**Формулювання цілей досліджень.** Метою цієї роботи є формування наукового підґрунтя для визначення вимог до протипожежного захисту зарядних станцій для електромобілів під час їх проєктування.

Об'єктом досліджень є процес забезпечення протипожежного захисту зарядних станцій для електромобілів.

Предмет досліджень – вплив чинників пожежної небезпеки на протипожежний стан зарядних станцій для електромобілів.

Для досягнення поставленої мети необхідно провести аналітичні дослідження вимог, що висуваються до протипожежного захисту зарядних станцій для електромобілів у вітчизняних та закордонних нормативних документах, науково-технічній та патентній інформації, інших інформаційних джерелах. Окрім цього, слід проаналізувати набутий експлуатаційний досвід електромобілів, а також досвід облаштування інфраструктури місць для їх заряджання.

Важливим питанням є визначення вимог до машино-місць зарядки електромобілів, які розміщені на території багатопаливних автозаправних станцій, у складі яких є значна кількість технологічного обладнання, що має різний рівень небезпеки через тип та кількість небезпечних речовин, котрі знаходяться в технологічному обігу.

Серед важливих об'єктів інфраструктури, які потребують розроблення вимог пожежної безпеки під час облаштування місць заряджання електромобілів, слід відокремити будівлі закритих паркінгів як найбільш пожежонебезпечні об'єкти з погляду кількості пожежного навантаження, потенційних негативних наслідків від можливих пожеж, а також необхідності забезпечення безпечної евакуації людей з будівель.

**Методи дослідження.** В роботі було використано аналітичний метод

дослідження особливостей реалізації факторів пожежної небезпеки на зарядних станціях для електромобілів та вимог, що висуваються до протипожежного захисту цих станцій у вітчизняних та закордонних нормативних документах, науково-технічній та патентній літературі.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** За результатом досліджень Норвезького інституту пожежної безпеки, однією із причин швидкого поширення вогню та тяжких наслідків через пожежу є значне збільшення конструктивних елементів із горючих матеріалів (пластику та композитних матеріалів, гуми, поролону) в сучасних автомобілях. За оцінками дослідників, станом на 2020 рік обсяг пластику в автомобілях загалом збільшився до 350 кг порівняно з 200 кг у 2014 році, що зумовлює збільшення пожежної навантаги. Крім того, існує світова тенденція до збільшення габаритів автомобілів, що призводить до зменшення відстані між припаркованими автомобілями на стандартних машино-місцях автостоянок. Ці чинники значно впливають на ймовірність того, що пожежі будуть розвиватися швидше і з більшими матеріальними втратами [7].

Сьогодні вважається, що електроліти, які використовуються в літій-іонних тягових акумуляторних батареях електромобілів, порівняно з автомобілями, обладнаними двигуном внутрішнього згоряння, є менш небезпечними. Разом із тим слід зауважити, що значна кількість пожеж електромобілів супроводжувалася вибухами. Це зумовлено тим, що літій є активним лужним металом, який під час контакту із водою утворює луг (гідрооксид літію) з виділенням молекулярного водню, котрий у разі змішування з повітрям утворює вибухонебезпечну суміш – так званий «гримучий газ».

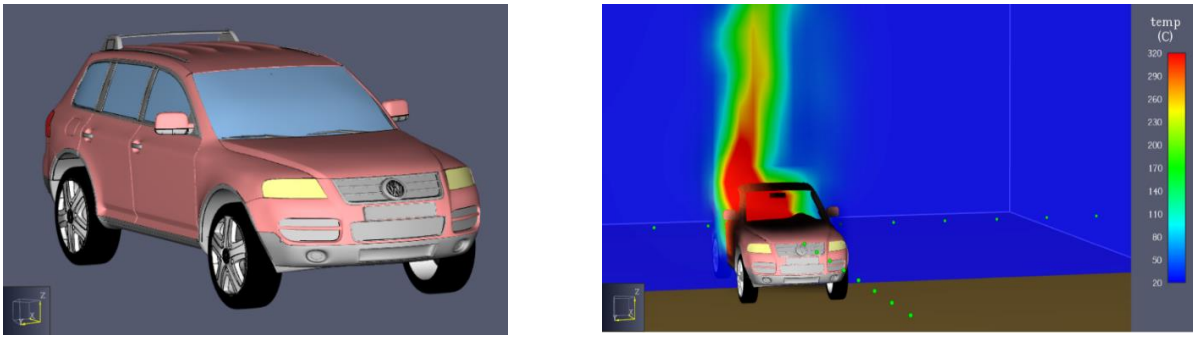
Серед потенційних небезпек, які можуть спричинити пожежу, слід наголосити на пошкодженні електромобіля та зарядної стації водіями під час паркування. Аналіз зарубіжного досвіду показав, що облаштування машино-місць із системою зарядки електромобілів стаціонарним дорожнім відгородженням (колесовідбійниками) може захистити зарядну станцію від пошкоджень транспортом масою до 3,5 т, що рухається на швидкості до 10 км/год [10].

У разі визначення вимог до планування машино-місць із системою зарядки електромобілів варто враховувати необхідність вільного під'їзду до зарядної станції, зважаючи на габаритні розміри електромобіля, та забезпечення вільного підходу до порту (зарядного кабелю) зарядної станції шириною не менше 1 м. Також слід брати до уваги площу для розмітки машино-місць в кількості не менше одного машино-місця на кожний зарядний порт зарядної станції.

З огляду на випадки виникнення пожеж через вплив навколишнього середовища, а саме – пошкодження тягових акумуляторів електромобіля та обладнання зарядних станцій через підтоплення водою внаслідок дощів, планування машино-місць слід здійснювати з урахуванням ландшафту автостоянки. Під час облаштування місць заряджання електромобілів на автостоянках та електрозарядних станціях варто враховувати наявність систем водовідведення та приймачів зливостічних колодязів, які унеможливлюють підтоплення електромобілів. У разі розташування на автостоянках машино-місця для зарядки електромобілів на схилі слід передбачати нагірні канави для відведення дощових і талих вод.

Важливим питанням протипожежного захисту інфраструктури зарядних станцій для електромобілів є обґрунтування протипожежної відстані між машино-місцем для зарядки електромобіля та суміжними машино-місцями для стоянки електромобілів або автомобілів з двигуном внутрішнього згоряння. Вирішення цього завдання можливе із застосуванням сучасних програмних комплексів, зокрема таких як Fire Dynamics Simulator (FDS) для комп'ютерного моделювання можливості поширення вогню, значення теплового потоку та його можливого впливу на

суміжні об’єкти. На рис. 1 наведено фрагмент FDS моделі електромобіля, що буде використовуватись під час дослідження температурних впливів для різних сценаріїв пожежі електромобілів та небезпечних чинників, які вона може спричинити.




а) б)

*Рисунок 1* – Фрагмент моделювання температурного впливу від пожежі електромобіля із використанням комп’ютерного FDS моделювання, де

а) – загальний вигляд електромобіля у створеній моделі; б) – фрагмент моделювання теплового впливу під час пожежі електромобіля

*Джерело:* розроблено авторами

Під час створення зазначеної вище комп’ютерної моделі електромобіля слід не тільки провести обґрунтування пожежного навантаження компонентів, які входять до складу конструкції електромобілів, а й дослідити конструкцію тягових акумуляторних батарей, як найбільш небезпечний елемент електромобіля.

Блок літієвих батарей складається з різних електрохімічних матеріалів, зокрема таких як катод, сепаратор і електроліт. Кожен із них має важливе значення для властивостей тягових батарей електромобілів щодо питомої енергії, терміну служби, безпеки та вартості. Тип матеріалу катода часто використовується для класифікації літій-іонних акумуляторів за групами через те, що їх хімічний склад є однією з основних змінних у конструкції батарей.

Оксид літій-кобальту (LCO) поширений у значній кількості звичайних побутових пристроїв, зокрема смартфонах. Він забезпечує відносно високу потужність і напругу порівняно з іншими катодними матеріалами і є досить простим у виготовленні. Водночас виникають значні проблеми щодо пожежної безпеки, зокрема в разі експлуатації літій-іонних акумуляторів за високої температури або випадкової перезарядки. Крім цього, вони мають низьку термостабільність. Таким чином, на сьогодні виробники обирають більш безпечні катодні матеріали, такі як літій-залізофосфат (LFP), літій-нікель, оксид марганцю і кобальту (NMC), літій-оксид марганцю (LMO) або суміші різних катодних матеріалів. На рис. 2 наведено принципову схему конструкції літій-іонних акумуляторів.

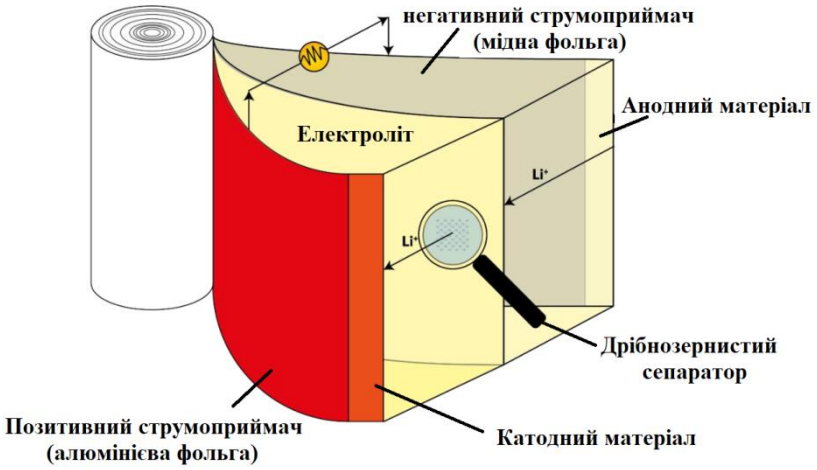



*Рисунок 2* – Принципова схема конструкції літій-іонних акумуляторів

*Джерело: розроблено авторами*

Характеристики катодних матеріалів можуть бути параметрично змінені у разі їх змішування, через що їх називають гібридними або змішаними катодними матеріалами. Нині оксид алюмінію (NCA) у парі з графітовими анодами є найбільш поширеними катодними матеріалами. В табл. 1 наведено властивості літій-іонних тягових акумуляторів електромобілів залежно від типів катодних матеріалів згідно з [11].

*Таблиця 1* – Порівняльні властивості типів літій-іонних тягових акумуляторів для електромобілів

| Позначення | Ємність акумулятора, А·год /кг | Напруга у разі 50% заряду, В | Надійність батареї | Пожежна безпека | Відносна вартість виробництва |
|---|---|---|---|---|---|
| LFP | 160 | 3,4 | висока | висока | середня |
| LMO | 100-120 | 4 | низька | середня | низька |
| LCO | 155 | 3,9 | середня | низька | середня |
| NCA | 180 | 3,7 | середня | низька | висока |
| NMC | 160 | 3,8 | висока | середня | висока |

*Джерело*: розроблено авторами

Важливо розуміти, що значне пожежне навантаження є не єдиним небезпечним чинником тягових акумуляторних батарей електромобілів, зокрема можливість виділення ними внаслідок горіння небезпечних токсичних речовин у навколишнє середовище створює небезпечні передумови для евакуації людей, а також роботи пожежно-рятувальних підрозділів, які залучаються до гасіння пожеж.

Актуальним питанням пожежної небезпеки тягових акумуляторів електромобілів є можливість їх вибуху під час гасіння пожежі електромобіля, що зумовлює необхідність врахування цього керівником гасіння пожеж для забезпечення безпеки особового складу пожежно-рятувальних підрозділів, які можуть бути травмовані під час вибуху батареї, що вже відбувалося.

Під час планування машино-місць із системою зарядки електромобілів (СЗЕ) в закритих гаражах (паркінгах) також слід обґрунтувати вимоги, які унеможливлюють перешкоджання потоку людей, котрі евакуюються під час можливої пожежі до шляхів евакуації. Тобто такі машино-місця не мають перешкоджати руху людей по тротуарах, доріжках, проходах тощо. Під час проєктування машино-місць із СЗЕ в гаражах (паркінгах) вони повинні

розташовуватись поруч з одним із виїздів / в'їздів з протипожежних відсіків для можливості забезпечення оперативного доступу до них пожежно-рятувальних підрозділів.

Серед пріоритетних питань нормування залишаються вимоги до конструкцій, на яких встановлюються зарядні станції для електромобілів. Аналіз зарубіжних нормативних документів та технічних звітів показав, що дозволяється встановлювати зарядні станції (далі – ЗС) на поверхні зовнішніх суцільних стін окремих типів будинків без прорізів та споруд, облицювання яких виконано з негорючих матеріалів. Також слід розглянути питання можливості влаштування ЗС для електромобілів на зовнішніх стінах будинків, облицювання яких виконано з матеріалів групи горючості Г1 згідно з вітчизняною класифікацією [10], за умови виділення місця встановлення протипожежного поясу з негорючих матеріалів по периметру щодо ЗС, який унеможливить поширення пожежі зовнішніми фасадними конструкціями.

Важливим питанням облаштування машино-місць зарядки електромобілів є обґрунтування типів і кількості систем протипожежного захисту та первинних засобів пожежогасіння для забезпечення пожежної безпеки. Безумовно, необхідним заходом протипожежного захисту для гаражів і паркінгів є встановлення адресних пожежних сповіщувачів, які входять до складу системи пожежної сигналізації будівлі, з передбаченням можливості автоматичного відключення електроживлення ЗС у разі спрацювання пожежного сповіщувача з урахуванням вимог [12]. Єдиним винятком відсутності адресних пожежних сповіщувачів можуть бути окремо розташовані індивідуальні бокси.

Також у закритих гаражах (паркінгах), де плануються машино-місця із ЗС, необхідно передбачати систему припливно-витяжної вентиляції згідно з вимогами [12], а також систему відеоспостереження з виведенням зображення до приміщення чергового персоналу (охорони) для можливості здійснення оперативних дій в разі виникнення пожежі.

Актуальним питанням також є напрям наукових досліджень щодо розроблення методів та способів гасіння електромобілів в разі їх загоряння, зокрема через те, що у більш як у 30% випадків пожеж електромобілів упродовж перших 48 годин спостерігалося їх повторне займання, в тому числі, коли автомобіль уже знаходився в закритому приміщенні станції технічного обслуговування [13]. Таким чином, варто дослідити заходи, які передбачаються для запобігання повторному займанню та стабілізування вогненебезпечного середовища.

Також слід зазначити, що важливою складовою протипожежного захисту машино-місць із системою зарядки електромобілів є розроблення вимог і правил, які стосуються безпечної експлуатації ЗС. На сьогодні у Правилах [14] не встановлюються вимоги пожежної безпеки, яких необхідно дотримуватись під час заряджання електромобілів на зарядних станціях, що ставить під загрозу безпеку зарядки електромобілів, зокрема в громадських місцях.

**Висновки та напрями подальших досліджень.** Аналіз даних про пожежі на зарядних станціях для електромобілів за кордоном показав необхідність нормативного забезпечення та обґрунтування відповідних протипожежних вимог як основи створення безпечного середовища із упровадження технологій використання альтернативних транспортних засобів та відновлювальної енергетики загалом.

Встановлено, що згідно з чинною в Україні нормативною базою доцільно розробити вимоги пожежної безпеки для ЗС електромобілів, гаражів (паркінгів), автостоянок електрозарядних станцій, в тому числі суміщених з автозаправними станціями з урахуванням можливого негативного впливу від можливої пожежі на суміжні потенційно небезпечні об'єкти.

Також слід наголосити на необхідності удосконалення та розвитку способів гасіння електромобілів в разі їх загоряння, вибору найбільш ефективної вогнегасної речовини. Нині гасіння електромобілів та зарядних станцій ускладнено необхідністю застосування спеціальних засобів пожежогасіння, які призначені для гасіння електрообладнання, а також неможливістю застосовувати звичайну воду.

Перспективним напрямом наукових досліджень є подальше удосконалення Правил пожежної безпеки в Україні та внесення відповідних змін, які забезпечать безпечні умови експлуатації систем зарядки електромобілів та зменшать ризик як для людей, які користуються електромобілями, так і для пожежно-рятувальних підрозділів, які зможуть ефективно виконувати пожежно-рятувальні роботи та діяти з прийнятним рівнем безпеки.

З огляду на стрімкий розвиток «зеленої» транспортної інфраструктури та через брак на сьогодні вимог щодо облаштування машино-місць, обладнаних системами зарядки електромобілів, необхідно комплексно підійти до реалізації цього завдання, починаючи від термінологічного врегулювання понять та закінчуючи розробленням комплексу об'ємно-планувальних і конструктивних заходів під час проєктування таких машино-місць, що забезпечить реалізацію положень Закону [2] щодо створення доступу до інфраструктури зарядних станцій для електромобілів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ


1. Китіна М. В Україні вперше порахували кількість зарядних станцій для електромобілів : чотири машини на одну заправку *Autogeek.* 2021. URL : https://autogeek.com.ua/zarydni-stancii/ (дата звернення : 24.04.2022).
2. Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо створення доступу до інфраструктури зарядних станцій для електромобілів : Закон України від 11.07.2019 р. № 2754-VII. *Відомості Верховної Ради (ВВР).* 2019. № 32. Ст. 125.
3. ДБН Б.2.2-12:2019 Планування і забудова територій. [Чинний від 2019-04-26]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2019. 185 с.
4. ДБН В.2.3-15:2007 Споруди транспорту. Автостоянки і гаражі для легкових автомобілів. [Чинний від 2017-02-07]. Київ : Гіпроцивільпромбуд, 2007. 52 с.
5. Рудинець М. В., Скалига М. М. До питань забезпечення безпеки зарядних станцій електромобілів в Україні. *Цивільна безпека як чинник розвитку виробничої та невиробничої сфер суспільства :* матер. всеукраїнської наук.-практ. конф., м. Луцьк., 20 –21 квіт. 2018 р. Луцьк : РВВ Луцького НТВ, 2018. 129 с.
6. Електромобільний шлях України. Ч. 2. Дослідження інфраструктури зарядних станцій компанією Renault в Україні. URL : https://www.renault.ua/discover-renault/renault-inukraine/news/electrocars-way-of-ukraine-2.html/ (дата звернення : 24.04.2022).
7. Emergency Response to Incidents Involving Electric Vehicle Battery Hazards : Full-Scale Testing Results, International Symposium on Fire Investigation Science and Technology / за ред. Long, R. T. Jr., Blum, A. F. USA : *International Symposium on Fire Investigation*. 2020. 87 c.
8. Investigation of massive fire in a multi-storey car park in Norway. *Fire spread and contribution from electrical vehicles.* 2020. Вип. 1. Т. 1. С. 2–24.
9. Research on the Fire Hazards of Cells in Electric Car Batteries / O. Lazarenko, V. Loik, B. Shtain, D. Riegert. *Bezpieczeństwo i technika pożarnicza*. 2018. Vol. 52. Issue 44. P. 58–67.
10. BS 7671 : 2018 + A1: 2020: Requirements for electrical installations. IET Wiring Regulations, British Standards Institution.
11. Safety & transport fire research. Fire Safety of Lithium-Ion Batteries in Road Vehicles / Roeland Bisschop, Ola Willstrand, Francine Amon, Max Rosengren. RISE Research Institutes of Sweden, 2020. P. 107.
12. ДБН В.2.5-56:2014 . Системи протипожежного захисту. [Чинний від 2015-07-01]. Вид. Офіц. Київ : Мінрегіон України, 2015. 127 с.
13. Long, R.T. Jr., Blum, A.F., Emergency Response to Incidents Involving Electric Vehicle Battery Hazards. *Full-Scale Testing Results :* International Symposium on Fire Investigation Science and Technology, USA, 2014.
14. Про затвердження Правил пожежної безпеки в Україні : наказ МВС України від 30.12.2014 р. № 1417. Київ : МВС України, 2014. 24 с.


## REFERENCES


1. Ky`tina, M. V Ukrayini vpershe poraxuvaly` kil`kist` zaryadny`x stancij dlya elektromobiliv: choty`ry` mashy`ny` na odnu zapravku [For the first time in Ukraine, the number of charging stations for electric vehicles was counted : four cars per gas station], Autogeek. 2021. Resource access mode : https://autogeek.com.ua/zarydni-stancii/. [in Ukrainian].
2. Zakon Ukrayiny` vid 11.07.2019 p. № 2754-VIII «Pro vnesennya zmin do deyaky`x zakonodavchy`x aktiv Ukrayiny` shhodo stvorennya dostupu do infrastruktury` zaryadny`x stancij dlya elektromobiliv» [On Amendments to Certain Legislative Acts of Ukraine Concerning the Creation of Access to the Infrastructure of Charging Stations for Electric Vehicles], Vidomosti Verxovnoyi Rady`, 2019, № 32, st. 125. [in Ukrainian].

3. DBN B.2.2-12:2019 [Planning and development of territories], *Nakaz Minregionu Ukrayiny` vid 26.04.2019 № 104. Ky`yiv : Ukrayins`ky`j derzhavny`j naukovo-doslidny`j insty`tut proektuvannya mist «Dipromisto» imeni Yu.M. Bilokonya*, 2019. 185 s. [in Ukrainian].
4. DBN V.2.3-15:2007 [Transport facilities. Parking lots and garages for cars], *Nakaz Minregionu vid 07.02.2007 № 44 «Pro zatverdzhennya derzhavny`x budivel`ny`x norm». Ky`yiv : Zakry`te akcionerne tovary`stvo insty`tut «Giprocy`vil`Prombud»*, 2007. 52 s. [in Ukrainian].
5. Rudy`necz M., Skaly`ga M. [On ensuring the safety of charging stations for electric vehicles in Ukraine], *Lucz`ky`j nacional`ny`j texnichny`j universy`tet, m. Lucz`k.* [in Ukrainian].
6. Elektromobil`ny`j shlyax Ukrayiny`. Chasty`na 2 [Research of charging station infrastructure by Renault in Ukraine], *Elektrony`j resurs : https://www.renault.ua/discover-renault/renault-inukraine/news/electrocars-way-of-ukraine-2.html.* [in Ukrainian].
7. Emergency Response to Incidents Involving Electric Vehicle Battery Hazards: Full-Scale Testing Results, International Symposium on Fire Investigation Science and Technology za red. Long, R.T. Jr., Blum, A.F. USA : *International Symposium on Fire Investigation*, 2020. 87 c. [in English].
8. Investigation of massive fire in a multi-storey car park in Norway // *Fire spread and contribution from electrical vehicles*. 2020., вип. 1. Т. 1. С. 2–24. [in Norway].
9. Research on the Fire Hazards of Cells in Electric Car Batteries / O. Lazarenko, V. Loik, B. Shtain, D. Riegert // *Bezpieczeństwo i technika pożarnicza*. 2018. Vol. 52. Issue 44. Pp. 58–67. [in Ukrainian].
10. BS 7671: 2018 + A1: 2020 : Requirements for electrical installations. *IET Wiring Regulations, British Standards Institution*. [in Ukrainian].
11. Safety & transport fire research. Fire Safety of Lithium-Ion Batteries in Road Vehicles / Roeland Bisschop, Ola Willstrand, Francine Amon, Max Rosengren. *RISE Research Institutes of Sweden*, *2020. Pp.107*. [in Sweden].
12. DBN V.2.5-56:2014. [Fire protection systems], *Nakaz Minregionu Ukrayiny` vid 13.11.2014 № 312, 62 st*. [in Ukrainian].
13. Long, R.T. Jr., Blum, A.F., Emergency Response to Incidents Involving Electric Vehicle Battery Hazards : Full-Scale Testing Results, International Symposium on Fire Investigation Science and Technology, 2014, 12 [in English].
14. Nakaz Ministerstva vnutrishnix sprav Ukrayiny`, [About the statement of Rules of fire safety in Ukraine] vid 30.12.2014 № 1417, 2014. 24 st. *Zareyestrovano v Ministerstvi yusty`ciyi Ukrayiny` 05 bereznya 2015 r. za № 252/26697* [in Ukrainian].

## CURRENT ISSUES OF DEVELOPING REQUIREMENTS OF FIRE PROTECTION OF CHARGING STATIONS FOR ELECTRIC VEHICLES

*V. Nizhnyk, O. Sizikov, Yu. Feshchuk, Ya. Ballo, O. Zhikharev, A. Tsyhankov*

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

KEYWORDS:

electric car charging system; charging stations; fire protection; parking space planning; electric car; design requirements

ANNOTATION

The analysis of data on the issues of normative-legal provision of fire safety during the installation of charging stations for electric cars both in open parking lots and in garages (parking lots) is given. The problematic issues of the current regulations in Ukraine are considered and the shortcomings in the existing requirements to the fire protection complex as a component of the infrastructure of charging stations for electric vehicles are revealed. Analytical studies of the causes and consequences of fires that occurred at charging stations and in electric vehicles during their charging. The need to substantiate the requirements for planning parking spaces with a charging system for electric vehicles has been identified. The issue of planning parking spaces with a charging system for electric vehicles on the territory of open parking lots, closed parking lots, as well as places located on the territory of gas stations is considered. An example of the possibility of using the Fire Dynamics Simulator software for computer simulation of scenarios for the spread of fire hazards and their negative impact on related infrastructure. The issue of arrangement of electric vehicle charging points with separate types of fire protection systems and the need to determine the necessary primary means of fire extinguishing to ensure fire safety of the object of protection are considered. The issue of improving the methods of extinguishing electric vehicles, charging stations for electric vehicles and preventing their re-ignition is considered. An analysis of the causes of potential threats during the extinguishing of electric vehicles for fire and rescue units is given. The list of normative-legal acts that need improvement is determined, and also the necessity of development of the national standard which will establish the basic requirements of fire safety of parking places for charging of electric vehicles at their designing is proved.

*УДК 614.842/.847*

# ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВОДНИХ ВОГНЕГАСНИХ РЕЧОВИН НА ОСНОВІ РІДКОГО СКЛА

*https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.1.24-34*

Кодрик А. І., ORCID iD 0000-0002-3787-5674
Коваленко В. В.,ORCID iD 0000-0001-5780-5684
Тітенко О. М., ORCID iD 0000-0002-4950-8580
Борисов А. В*. ORCID iD 0000-0001-6858-0492
Стилик І. Г., ORCID iD 0000-0002-8474-2014
Борисова А. С. ORCID iD 0000-0002-8700-0761
*E-mail: andr.borisov@ukr.net

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

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

*Надійшла до редакції: 25.05.2022*
*Пройшла рецензування: 30.05.2022*

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

водні вогнегасні речовини; модифікування; охолодження; розбавлення; інгібування; час займання; припинення горіння; ефективність гасіння

АНОТАЦІЯ

Розглянуто особливості взаємодії водних вогнегасних речовин з горючими середовищами і поверхнями горіння твердих горючих речовин як підґрунтя покращення показників якості наявних та розроблення нових зразків водних вогнегасних речовин з використанням гелеутворювальних сполук на основі рідкого скла, а також підвищення вогнегасної ефективності під час їх застосування в елементах систем протипожежного захисту об’єктів та пожежогасіння. Наведено результати лабораторних та натурних випробувань, що доводять доцільність поєднання компонентів рідкого натрієвого скла та поташу в складі вогнегасних гелеутворювальних сполук. Проаналізовано сучасний стан щодо наявності та тенденцій розроблення у світовій та вітчизняній практиці вогнегасних речовин та технологій їх застосування. Окреслено можливі шляхи удосконалення рецептур та підвищення ефективності застосування вогнегасних речовин насамперед з огляду на критерії ефективності, економічності та екологічності. Доведено, що порівняно з водою вогнегасні розчини на основі модифікованих систем та нових технологій їх продукування мають ряд переваг, які полягають в суттєвому збільшенні їх стійкості та адгезійних властивостей, підвищенні вогнезахисної дії через утворення під час подавання на полум’я пористого шару або плівки. Це ускладнює займання та захищає горючий матеріал внаслідок низької теплопровідності та ізолювання від доступу кисню повітря, що важливо у разі гасіння поверхневих пожеж класу А. На підставі аналізу використаних джерел, а також власних теоретичних та експериментальних досліджень сформовано наукову базу для подальшого науково-технічного прогресу у практичній діяльності виробників та споживачів продукції протипожежного призначення. Запропоновано шляхи удосконалення складів водних вогнегасних речовин та технологій їх застосування.

**Постановка проблеми.** Більшість сучасних технічних засобів, які знаходяться на озброєнні пожежно-рятувальних підрозділів, безпосередньо на гасіння пожеж використовують тільки 5...10% від загальної поданої для цього води. Це пояснюється фізико-механічними властивостями води, насамперед низькою в'язкістю, яка визначає здатність чинити опір переміщенню однієї з частин щодо інших, властивістю до мінімізації площі поверхні, що зумовлює поверхневий натяг у рідинах, та слабкою змочуваністю у разі контакту з твердою поверхнею, зокрема за

наявності пари, яка характеризує «прилипання – адгезію» рідини до поверхонь гасіння і розтікання на них. Послаблення цих ефектів можна досягти через введення невеликих кількостей загусників – водорозчинних полімерів, наприклад ефірів целюлози, що призводить до підвищення в'язкості водного розчину та підвищення адгезії вогнегасного засобу до палаючого об'єкта [1–3]. Головним завданням зазвичай є створення умов, за яких нівелюються недоліки води, тобто сприяння відсутності стікання та кращому ізолюванню поверхонь вогнезахисним прошарком. Потрібне поєднання в одній технологічній операції декількох способів гасіння: охолодження, ізоляції та інгібування, що дасть змогу підвищити ефективність гасіння, зменшити витрати води та призведе до гальмування швидкості хімічних реакцій у полум'ї та утворення на палаючих поверхнях захисних плівок, які внаслідок своєї низької теплопровідності та ізолювання від доступу кисню повітря унеможливлять повторне спалахування. З огляду на це розроблення нових сучасних зразків водних вогнегасних речовин з використанням сучасних гелеутворювальних сполук, а також підвищення вогнегасної ефективності під час їх застосування в елементах систем протипожежного захисту об'єктів та пожежогасіння є актуальним питанням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Таким чином, головними напрямами підвищення вогнегасної здатності води можна вважати зниження поверхневого натягу вогнегасного розчину, підвищення змочувальної здатності та в'язкості води через введення відповідних добавок, отримання оптимальної дисперсності краплин, додавання інгібіторів, використання води для утворення пінних розчинів за допомогою систем примусового подавання додаткового повітря [1; 4–7].

Ретельні дослідження щодо застосування гелеутворювальних складів під час гасіння пожеж проведено в Національному університеті цивільного захисту України, результати яких викладено у працях [8–9]. В цих роботах запропоновано й обґрунтовано способи та засоби гасіння пожеж горючих матеріалів з використанням гелеутворювальних систем (на базі неорганічних сполук), основою яких є полісилікат натрію. Як коагулятори рекомендовано водні розчини солей багатовалентних металів. Для спрощення і забезпечення стабільності запропоновано роздільне подавання водних розчинів компонентів гелеутворювальних систем з наступним їх змішуванням на поверхні горіння або в спеціальному стволі. Після змішування компонентів гелеутворювальних систем на поверхнях утворюється шар гелю, який має високі вогнезахисні властивості. Вогнегасні гелеутворювальні системи (далі – ГУС) являють собою як мінімум два компоненти, які одночасно подають до камери змішування. Перший склад – це розчин гелеутворювального компоненту, а другий – склад-розчин каталізатора гелеутворення. За одночасного подавання двох розчинів вони змішуються, між компонентами розчинів відбувається взаємодія, що призводить до утворення спочатку золь-гелю, а потім – стійкого гелю. Гель утворює на поверхні нетекучий вогнезахисний прошарок, який надійно утримується на вертикальних і похилих поверхнях. Перевага гасіння ГУС порівняно з гасінням водою полягає у суттєвому зменшенні витрат вогнегасної речовини через відсутність стікання та краще ізолювання поверхонь вогнезахисним прошарком. Це дає змогу не тільки скоротити час гасіння, а й зменшити збитки внаслідок заливання нижніх поверхів. Практичне застосування гасіння пожеж з використанням ГУС не отримало широкого впровадження через складність реалізації такої технології.

Автори [10–13] запропонували спосіб гасіння пожеж твердих горючих матеріалів з використанням рідкого скла в концентраціях від 5 до 50%. Рідке скло або розчинний силікат лужних металів літію, калію, натрію являє собою в'язку рідину із загальною хімічною формулою

$R_2O \cdot m\ SiO_2 \cdot n\ H_2O$ (де RO – оксид лужного металу, m – модуль рідкого скла, який знаходиться в межах 2,5…3,2) з густиною від 1 400 до 1 500 кг/м$^3$ і коефіцієнтом динамічної в'язкості до 1 Па·с. Рідке скло змішується з водою в будь-яких співвідношеннях і змінює в'язкість розчину від 0,004 до 0,5 Па·с у разі зміни густини розчину з 1 020 до 1 250 кг/м$^3$ під час використання ГУС на основі неорганічних сполук. У зазначеному діапазоні концентрації рідкого скла у складі водного розчину в'язкість розчину збільшується в 4 500 разів порівняно з в'язкістю води 0,001 Па•с за температури 20 °С. Автори стверджують, що така зміна в'язкості водних розчинів, використовуваних для гасіння пожеж, практично недосяжна у разі використання органічних або інших неорганічних загусників. Водночас істотно підвищується щільність розчину, що сприяє збільшенню кінетичної енергії руху струменя розчину порівняно з енергією струменя води, спрямованої в осередок горіння з однаковою швидкістю. Дальність польоту струменя розчину також збільшується. У роботах [11–12] наведено феноменологічний опис процесу гасіння твердих горючих матеріалів (далі – ТГМ) запропонованими розчинами.

Наведений опис процесів потребує уточнення, оскільки не враховує додаткових ефектів, що відбуваються під час потрапляння запропонованої водної вогнегасної речовини (далі – ВВР) на поверхню розжареного ТГМ (ефект Лейденфроста тощо). Також потребують уточнення й кількісні характеристики, оскільки вони отримані під час попереднього нанесення ВВР на рейки деревини за температури 20 °С з подальшими випробуваннями в муфельній печі без впливу відкритого полум’я.

Також вбачається, що під час розроблення складу ВВР на основі рідкого скла перспективним буде додавання компонентів, що до того ж забезпечують підсилення ефекту інгібування ланцюгових реакцій горіння. Водночас слід очікувати підвищення ефективності гасіння як горіння ТГМ, так і перешкоджання його повторному займанню. В цьому сенсі для підвищення вогнегасної ефективності до гелеутворювальних водних розчинів додають солі, наприклад хлорид натрію, карбонат амонію, бікарбонат калію [14] і, таким чином, створюють комбіновані ВВР.

У роботі [14] досліджувалися вплив рідкого натрієвого та калієвого скла на випаровуваність вогнегасної речовини в часі залежно від її складу, зміна поверхневого натягу та здатність до прилипання, зміна кінематичної та динамічної в’язкості залежно від складу та концентрації композицій, залежність часу займання матеріалу, обробленого рідким склом. Встановлено, що:

- випаровуваність рідини у статичному стані для водного розчину рідкого скла (натр.) за типових значень може досягати близько 80 % (відносно випаровуваності води);

- величина поверхневого натягу у першому наближенні залежить тільки від вмісту поверхнево-активних речовин (далі – ПАР) та його критичної величини, що орієнтовно дорівнює 0,1 % практично незалежно від вмісту інших компонентів, з яким проводилися експерименти;

- величина відносної здатності до прилипання розчину з додаванням рідкого скла збільшується з підвищенням його концентрації у розчині.

**Формулювання цілей досліджень.** Метою цієї роботи є пошук шляхів підвищення ефективності ВВР на основі рідкого скла внаслідок додавання цільових хімічних добавок.

Об’єктом досліджень є процес гасіння ТГМ із використанням ВВР на основі рідкого скла.

Предмет досліджень – вплив фізико-хімічних властивостей активних добавок до води на реалізацію комплексу факторів припинення горіння під час гасіння ТГМ із використанням ВВР на основі рідкого скла.

Для досягнення поставленої мети необхідно провести аналітичні дослідження наявних даних теорії та практики пожежогасіння із використанням ГУС для визначення найбільш перспективних додаткових компонентів у складах ГУС на основі рідкого скла та відповідний комплекс лабораторних і натурних випробувань з визначення ефективності гасіння ТГМ із використанням ВВР обраних складів.

**Методи дослідження.** В роботі було застосовано аналітичний метод дослідження особливостей реалізації факторів припинення горіння ТГМ під час їх гасіння складами ГУС на основі рідкого скла. Представлено результати лабораторних та натурних досліджень залежності часу займання матеріалу, обробленого рідким склом різної концентрації, та впливу зміни складу й концентрації ВВР на їх вогнегасну здатність під час гасіння модельних вогнищ.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** На основі аналізу наведених вище джерел як перспективні вибрані ВВР на основі ГУС у складі таких компонентів: рідкого натрієвого та калієвого скла й поташу ($K_2CO_3$). Для підвищення змочувальної здатності та зменшення поверхневого натягу ВВР застосовувалося додавання піноутворювачів (далі – ПУ), таких як AFFF та Альпен.

Для виявлення впливу концентрацій гелеутворювальних компонентів на характеристики протидії вогню у разі займання соснової деревини у полум'ї газового пальника вимірювався час займання подрібненої соснової деревини фракційністю 3…15 мм і товщиною 1,5 мм. Використовували водні розчини рідкого натрієвого скла з концентраціями 0,5 %, 1 %, 2 %, 5 %, 10 %, 20 % та 50 %, рідкого калієвого скла з концентрацією 0,5 %, 1 %, 2 %, 5 %, 10 %, 20 %. Розчини готувалися до проведення дослідів, позначалися, та їх позначення заносили до таблиці.

Дослідні зразки соснової деревини у кількості 4,5 г розміщували у 150 г відповідного розчину, перемішували протягом 10 с та перекладали на металеве сито, давали стекти вільній речовині протягом 30 с, переміщували на зважене металеве сітчасте деко (рис. 1, а), зважували разом з обробленим відповідним розчином дослідним зразком, розміщували над полум'ям газової горілки та фіксували час займання. Температура полум'я фіксувалася за допомогою каліброваного інформаційно-вимірювального комплексу «Термоконт» і складала 800…850 С. Отримані результати заносили до протоколу випробувань. Кожен дослід проводили тричі.



а б в

*Рисунок 1* – Процес визначення часу займання: (а) під час застосування водного рідкого натрієвого скла; загальний вигляд деревини (б) після припинення досліду; утворення твердої захисної плівки (в) на поверхні сітчастого дека після припинення досліду

*Джерело:* розроблено авторами

Аналізуючи отримані дані, слід зауважити, що у разі додавання рідкого скла у концентрації понад 3 % займання деревини не відбувається, на поверхні виникає захисна плівка, деревина втрачає у вазі, а процес горіння переходить у процес піролізу, який припиняється відразу після прибирання відкритого полум'я. Досліди проводили протягом 500 с. На рис. 1 наведено фото процесу визначення часу займання у разі застосування водного рідкого натрієвого скла, загальний вигляд деревини після припинення досліду та утворення твердої захисної плівки на поверхні сітчастого дека після припинення досліду.

За результатами випробувань побудовані графіки залежності часу займання й величини плівки на поверхні від складу вогнегасної речовини та концентрації у розчині:

- рідкого натрієвого скла, рис. 2;
- рідкого калієвого скла, рис. 3.

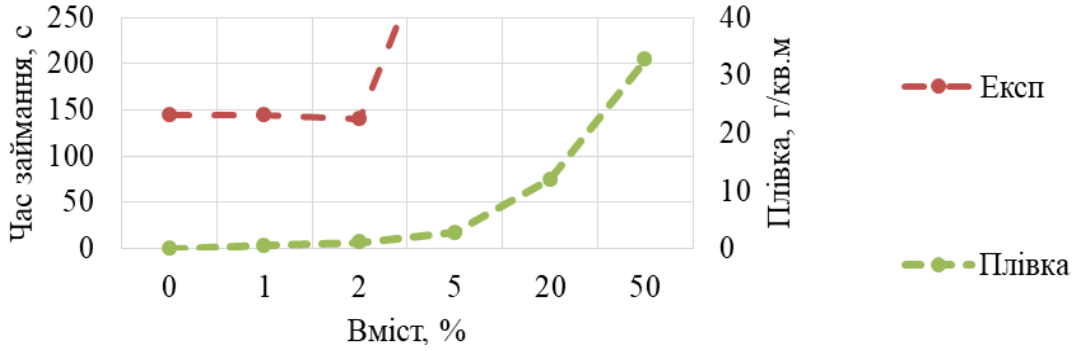



*Рисунок 2* – Залежність часу займання та величини плівки на поверхні від концентрації водного розчину рідкого скла (натр.)

*Джерело:* розроблено авторами

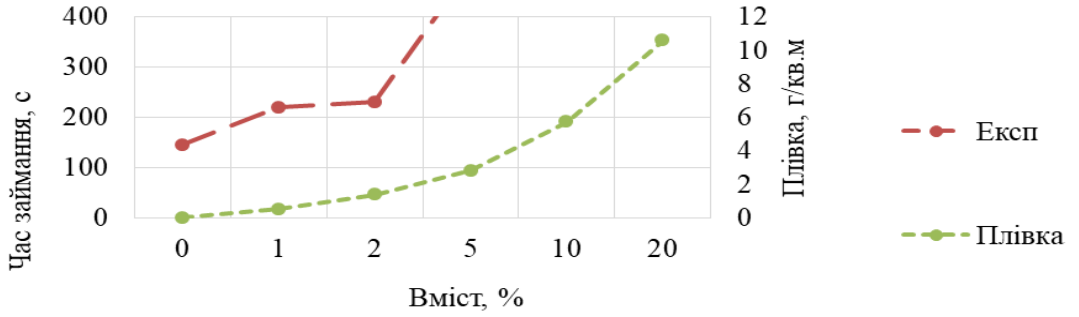



*Рисунок 3* – Залежність часу займання та величини плівки на поверхні від виду вогнегасної речовини та концентрації водного розчину рідкого скла (калій)

*Джерело:* розроблено авторами

Для визначення ефективності гасіння запропонованих розчинів були проведені їх порівняльні випробування під час гасіння вогнищ класу А в лабораторних умовах та модельних вогнищ класу 1А та 2А з використанням вогнегасників ВВ-9 на полігоні.

У лабораторних умовах дослідження з визначення відносної вогнегасної ефективності під час гасіння пожежі класу А тонко розпиленими струменями проводилися з урахуванням методів та результатів досліджень [1; 15–19]. До початку досліду було підготовлено досліджувані зразки ВВР через додавання до питної води, що відповідає ДСТУ 7525:2014, наведених вище компонентів у пропорціях згідно з таб. 1.

Також відомо [16; 20–21], що застосування як компонента до вогнегасної речовини солей калію (наприклад карбонату калію – поташу) ефективніше,

ніж застосування солей натрію (наприклад бікарбонату натрію – соди). Зважаючи на це, до програми дослідів ми включили застосування як добавки до вогнегасної речовини солей калію. Вимірювання витрат вогнегасної речовини, враховуючи в'язкість компонентів, проводили до початку та після закінчення експерименту.

Зауважимо, що під час використання лише води як вогнегасної речовини, модельне вогнище загасити не вдалося. Надалі як еталон для порівняння використовували розчин води з 0,2 % піноутворювача AFFF.

Склад вогнегасних речовин під час проведення експериментів з гасіння тонко розпиленим струменем модельних вогнищ наведено у табл. 1.

На рис. 4 наведена діаграма залежності часу гасіння модельного вогнища від складу (згідно з нумерацією складів табл. 1) вогнегасної речовини.

*Таблиця 1* – Склад вогнегасних речовин під час проведення експериментів з гасіння тонко розпиленим струменем модельних вогнищ

| № складу | Склад водного вогнегасного розчину |
|---|---|
| 1 | Рідке скло 15 %, плівкоутворювальний ПУ AFFF 0,2 %, залишок – вода |
| 2 | Вода та плівкоутворювальний ПУ AFFF 0,2 % |
| 3 | Рідке скло 12 %, поташ 12 %, плівкоутворювальний ПУ AFFF 0,2 %, залишок – вода |
| 4 | Рідке скло 6 %, поташ 6 %; плівкоутворювальний ПУ AFFF 0,2 % |

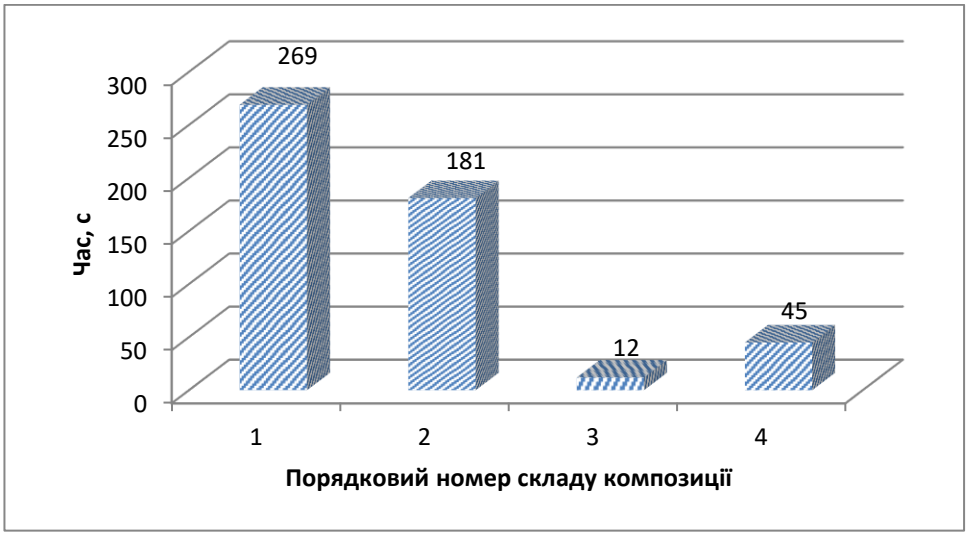



*Рисунок 4* – Діаграма залежності часу гасіння модельного вогнища від складу (згідно з нумерацією складів табл. 1) вогнегасної речовини

*Джерело:* розроблено авторами

Відносна ефективність гасіння *i*-тої вогнегасної речовини розраховується за формулами (1):

$$E_i = \frac{M_0}{M_i} \cdot \frac{T_0}{T_i}, \qquad (1)$$

де: $M_0$ – умовна витрата вогнегасної величини складу № 2 (згідно з нумерацією складів табл. 1), кг;

$M_i$ – умовна витрата вогнегасної величини для *i*-го складу вогнегасної речовини, кг;

$T_0$ – час, витрачений на гасіння з використанням вогнегасної величини складу № 2, с;

$T_i$ – час, витрачений на гасіння з використанням вогнегасної величини *i*-го складу, с.




Рисунок 5 – Діаграма залежності відносної ефективності гасіння модельного вогнища від складу (згідно з нумерацією складів табл. 1) вогнегасної речовини

*Джерело:* розроблено авторами

Аналізуючи результати експериментів, ми можемо відзначити, що, крім досліду 1 (додавання високої концентрації рідкого скла, де мало місце зменшення інтенсивності подачі ВВР до двох разів, внаслідок утворення на забірному фільтрі плівки скла, що спотворювало результати дослідів), наявним є підвищення відносної вогнегасної ефективності. Додавання поташу підвищує вогнегасну ефективність розчинів, але ускладнює склад ВВР. Зазначимо, що найбільший ефект досягнуто у разі додавання поташу та рідкого скла у мольному співвідношенні 1:1. Збільшення концентрації поташу та рідкого скла у розчині призводить до підвищення вогнегасної ефективності розчину.

Отже, найкращі результати отримали під час застосування розчинів рідкого скла і поташу. Слід зазначити, що під час гасіння модельних вогнищ пропонованими ВВР на поверхні модельних вогнищ утворювалися захисні плівки (рис. 6), які активно впливають на процес гасіння.



а б

*Рисунок 6* – Утворення захисної плівки після гасіння модельних вогнищ у разі застосування як вогнегасної речовини: рідкого скла та поташу (а); та рідкого скла (б)

*Джерело:* розроблено авторами

Для отримання більш об’єктивної оцінки ефективності запропонованих ВВР було проведено випробування в полігонних умовах під час гасіння модельних вогнищ класів 1А та 2А з використанням [22] вогнегасників ВВ-9(3)-Б.

Як контрольну вогнегасну речовину застосували стандартний заряд

вогнегасника ВВ-9(3)-Б – водний 6 % розчин піноутворювача загального призначення.

Унаслідок проведених експериментів з оцінки вогнегасної здатності щодо гасіння модельних вогнищ були виміряні та розраховані:

- час ліквідації відкритого полум'я;
- умовна витрата вогнегасної речовини для ліквідації відкритого полум'я (величина, що незалежна від розміру модельного вогнища);
- відносна ефективність водної вогнегасної речовини.

Загальний час гасіння вогнища згідно з ДСТУ 3635-98 не перевищував 120 с. У табл. 2 наведено склади ВВР, які використовувалися під час проведення експериментів із прив'язкою до номера досліду.

*Таблиця 2* – Склади ВВР в експериментах за часом ліквідації відкритого полум'я модельних вогнищ 2А

| № експерименту | Модельне вогнище | Склад водного вогнегасного розчину |
|---|---|---|
| 1 | 1А | Як ПАР плівкоутворювальний AFFF 0,2 %, вода – решта |
| 2 | 2А | Як ПАР плівкоутворювальний AFFF 1 %, поташ 10 %, рідке скло (натрієве) 10 %, вода – решта |
| 3 | 2А | Вода та 6% ПУ загального призначення Альпен |

*Джерело:* Розроблено авторами

У зв'язку з тим, що під час експериментів використовувалися модельні вогнища (1А й 2А) та для можливості порівняння результатів бралися дві основні характеристики – витрата ВВР та ефективність гасіння ВВР, розрахунки проводились у вигляді умовної витрати ВВР за формулою (1) та відносної ефективності гасіння ВВР за формулою (2):

$$M_i = M_b \cdot \frac{S_{2A}}{S_{jA}}\ , \qquad (2)$$

де: $M_b$ = 6,570 – витрата вогнегасної речовини складу № 1 (див. табл. 3), що витрачена на повне гасіння модельного вогнища (різниця між масою вогнегасника до та після гасіння), кг;

$S_{2A}$ = 9,36 м$^2$ – площа вільної поверхні модельного вогнища 2А;

$S_{jA}$ – площа вільної поверхні модельного вогнища jA, що використовується для досліду з *i-тою* вогнегасною речовиною.

Відносна ефективність гасіння *i*-тої вогнегасної речовини розраховується за формулою (1), де як $M_0$ приймається умовна витрата вогнегасної величини складу № 1 (табл. 2), але в умовах використання різних модельних вогнищ обчислена за формулою (2), а як $T_0$ – береться час, витрачений на гасіння з використанням вогнегасної величини складу № 1 (табл. 2).

Оброблені результати експериментів щодо гасіння модельних вогнищ 1А та 2А з використанням вогнегасників ВВ-9(3)-Б, що заряджаються вогнегасними речовинами різного складу згідно з табл. 2, наведено в табл. 3.

*Таблиця 3* – Результати експериментів щодо гасіння модельних вогнищ 1А та 2А

| № складу | Витрата, кг | Вода, % | ПАВ, % | Рідке скло (натрієве), % | Поташ, % | Сульфат алюм., % | Мод. вогнище | Час ліквідації полум'я, с | Умовні витрати на ліквідацію, кг | Ефективність Гасіння, % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 6,570 | 99,8 | 0,2 | - | - | - | 1А | 57 | 13,08 | 1,00 |
| 2 | 8,555 | 79,0 | 1,0 | 10 | 10 | - | 2А | 23 | 8,555 | 3,79 |
| 3 | 8,580 | 94,0 | 6,0 | - | - | - | 2А | 120 | Не погашено | |

*Джерело:* розроблено авторами

Аналізуючи отримані результати можна зауважити, що додавання до водних розчинів рідкого скла та поташу підсилює ефективність гасіння. Зазначене можливо пояснити поєднанням (одночасною реалізацією) ефектів охолодження, ізолювання та інгібування.

**Висновки та напрями подальших досліджень.** Основні напрями підвищення вогнегасної ефективності водних вогнегасних речовин спрямовані на підвищення коефіцієнта використання води за призначенням через розроблення складів та технологій зниження поверхневого натягу вогнегасного розчину, підвищення змочувальної здатності та в'язкості води внаслідок застосування сучасних відповідних добавок, отримання оптимальної дисперсності краплин та додавання інгібіторів горіння.

1. Під час гасіння модельних вогнищ запропонованими ВВР на поверхні модельних вогнищ утворювалися захисні плівки, які сприяли процесу гасіння. Зазначимо, що найбільший ефект досягнуто у разі додавання поташу та рідкого скла у рівних пропорціях. Збільшення концентрації поташу та рідкого скла у розчині призводить до підвищення вогнегасної ефективності розчину.

2. Головними позитивними властивостями вогнегасного розчину рідкого скла є можливість зміни в'язкості ВВР у широкому діапазоні, збільшення щільності розчину та утворення ізолювальної плівки під час потрапляння на поверхню твердого тіла, що горить. Наведено обґрунтування використання водного розчину для гасіння пожеж, що містить 5…20 % рідкого скла. Перспективним є додавання в розчин рідкого скла поташу $K_2CO_3$ з метою підвищення інгібувальних властивостей вогнегасного розчину. Найбільший ефект досягнуто під час додавання поташу та рідкого скла у рівних пропорціях. Збільшення концентрації поташу та рідкого скла у розчині призводить до підвищення вогнегасної ефективності розчину.

Склади запропонованих ВВР потрібно оптимізувати в подальших дослідженнях залежно від напрямів їх використання. Додатково потребує вивчення вплив додавання до розчину диспергаторів для зменшення розмірів краплин.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ


1. Провести дослідження з розкриття особливостей процесів припинення горіння горючих речовин під час застосування сучасних вогнегасних речовин та технологій їх подавання : звіт про науково-дослідну роботу ; наук. кер. А. В.Антонов. Київ : УкрНДІЦЗ, 2015. 147 с.
2. Наконечный С. Н., Винокуров М. В., Михалин В. Н. Исследование влияния огнезащитного состава на воспламеняемость древесины. *Современные пожаробезопасные материалы и технологии* : сбор. материалов междунар. науч.-практ. конф., посвящ. году культ. безопас. (г. Иваново, 19 сент. 2018 г.). Ч. II. ЦЗ України. Харків. С. 96–100.
3. Жартовський С. В. Системний підхід до забезпечення активного і пасивного протипожежного захисту об'єктів. *14-та Всеукраїнська науково-практична конференція рятувальників* : збір. матеріалів. Київ : ІДУЦЗ, 2012. С. 180– 183.
4. Mathematical modeling of gas-liquid flow in compressed air foam generation systems / A. I. Kodrik, S. M. Shakhov, S. A. Vinogradov, O. M. Titenko, O. V. Parkhomchyk. *Technology audit and production reserves.* 2020. № 4/3(54). P. 29–35.
5. Consideration of thermodynamic processes formation of compressed-air foam in desing compressed air foam systems / A. I. Kodrik, S. M. Shakhov, S. A. Vinogradov, O. M. Titenko, O. V. Parkhomchyk. Science Forum : materials (Volume 1006), August 2020. URL : https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1006.11 (дата звернення : 05.05.2022).
6. Taylor R. G. Compressed air foam systems in limited staffing conditions. New Jersey : Morristown Fire Bureau, 1997. P. 75–112.
7. Залежність властивостей компресійної піни від робочих параметрів процесу генерування піни / А. І.Кодрик, О. М. Тітенко, С. М. Шахов, О. В. Куртов. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. Вип. 1(7). Київ : УкрНДІЦЗ, 2019. С. 54–63.
8. Ю. А. Абрамов, А. А.Киреев. Гелеобразующие огнетушащие и огнезащитные средства повышенной эффективности применительно к пожарам класса А : монографія. Харьков : НУГЗУ, 2015. 254 с.
9. Бабенко О. В. Використання явища гелеутворення для підвищення ефективності рідинних засобів пожежогасіння : дис... канд. техн. наук зі спеціальності «пожежна безпека» - 21.06.02 ; Академія цивільного захисту України. Харків, 2004. 225 с. С. 134–148.
10. Пат. 2275951 Россия МПК A62D 1/00 (2006.01). Водный раствор для тушения пожаров / Лотов В. А., Смирнов А. П., Лотова Л. Г. Заявлено. 09.11.2004; Опубл. 10.05.2006. Бюл. № 13.

11. Янц А. И., Павлов М. М. Жидкофазные огнетушащие составы на основе жидкого стекла. К вопросу применения огнетушащих составов на основе жидкого стекла при тушении лесного пожара. *Инновационная наука.* Уфа, 2017. № 8. С. 28–29.
12. Теличко Э. В. Применение огнетушащих составов на основе жидкого стекла. Информационные технологии (IT) в контроле, управлении качеством и безопасности : сборник научных трудов. *VIII Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее»*, 7– 12 октяб. 2019 г. Томск : ТПУ, 2019. С. 305–309.
13. Гидротермальный синтез полисиликатов при производстве вспененных водостойких материалов типа R2O·n SiO2 / И. М .Терещенко, О. Б. Дормешкин, А. П. Кравчук, Б. П. Жих. *Весці нацыянальнай акадэміі навук Беларусі*. *Серыя хімічных навук.* № 2. 2016.
14. Наукове обґрунтування підвищення ефективності гасіння пожеж за рахунок модифікації складів водних вогнегасних речовин та способів їх подавання : звіт про науково-дослідну роботу / наук. кер. А. І. Кодрик. Київ : ІДУ НД ЦЗ, 2021. 239 с.
15. Ivchenko O.A. Fire extingushing of forest flammable materials by hydrogels based on aluminum hydroxide / O. A. Ivchenko, K. E. Pankin. *Foresty Engineering Journal*. Vol. 9. No. 1(33). P. 76–84. DOI : 10.12737/article_5c92016e1314b2.49705560.
16. Research of the extinguishing properties of water and hydrogel with carbon nanoparticles for liquidation burning of the petroleum products / A. V. Ivanov та ін. *Fire and Explosion Safety*. 2017. Vol. 26. № 8. P. 31–44. DOI : 10.18322/PVB.2017.26.08. 31–44.
17. Христич В. В., Маляров М. В., Бондаренко С. М. Современные способы повышения эффективности тушения пожара распыленной водой. *Проблемы пожарной безопасности*. Харьков : НУГЗУ, 2013. Вип. 33. С. 176–182.
18. Кустов М. В. Розробка вогнегасного складу підвищеної ефективності на основі водних стабілізованих емульсій для гасіння пожеж класу «А» : автореф. дис. канд. техн. наук : 21.06.02. Харків, 2009. 24 с.
19. Жартовський С. В. Виявлення впливу хімічного складу водних вогнегасних речовин на основі $Na_2SiO_3$ та $K_2CO_3$ на їх вогнегасну ефективність під час гасіння вогнищ класу А .*Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій* : міжнар. наук.-практ. конф. ; Черкаси, 8–11 верес. 2016. 46–49 с.
20. Дослідження ефективності тонкорозпиленої водної вогнегасної речовини з цільовими добавками / С. В. Жартовський, В. В. Ніжник, О. О. Сізіков, Я. В. Балло, В. С. Бенедюк. *Пожежна та техногенна безпека. Теорія, практика, інновації* : міжнар. наук.-практ. конф., Львів. 2016. С. 158–162.
21. Козяр Н. М. Підвищення ефективності застосування водних та водопінних вогнегасних речовин : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 21.06.02 «Пожежна безпека». Київ, 2009. 23 с.
22. Сізіков, О. О. Вплив цільових добавок до води на ефективність гасіння пожеж твердих речовин. *Науковий вісник Нац. лісотехн. ун-ту України.* Львів, 2017. Т. 26. № 8. С. 293–303.

## REFERENCES

1. Nauk. ker. Antonov, A.V. (2015) Zvit pro naukovo-doslidnu robotu «Provesty doslidzhennia z rozkryttia osoblyvostei protsesiv prypynennia horinnia horiuchykh rechovyn pid chas zastosuvannia suchasnykh vohnehasnykh rechovyn ta tekhnolohii yikh podavannia» [in Ukraine].
2. Nakonechnii S. N., Vinokurov M. V., Mihalin V. N. Issledovanie vliyaniya ognezash'itnogo sostava na vosplamenyaemost drevesini. Sovremennie pozharobezopasnie materiali i tehnologii : sbor. materialov mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyash'. godu kult. bezopas, 19 sentiabria, chast II s. 96–100.TsZ Ukrainy, Kharkiv [in Ukraine].
3. Zhartovskyi, S. V. (2012) Systemnyi pidkhid do zabezpechennia aktyvnoho i pasyvnoho protypozhezhnoho zakhystu obiektiv // Materialy 14-yi Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii riatuvalnykiv. Kyiv, IDUNDCZ, S. 180– 83 [in Ukraine].
4. Kodrik, A. I., Shakhov, S. M., Vinogradov, S. A., Titenko, O. M., Parkhomchyk, O. V. (2020). Mathematical modeling of gas-liquid flow in compressed air foam generation systemsParkhomchyk. *Technology audit and production reserves*. № 4/3(54), P. 29–35 [in Ukraine].
5. Kodrik, A., Titenko, O., Vinogradov, S., & Shakhov, S. (2020). Consideration of Thermodynamic Processes Formation of Compressed-Air Foam in Design Compressed Air Foam Systems. *Materials Science Forum*, *1006*, 11–18. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1006.11 [in Ukraine].
6. Taylor, R. G. (1997) Compressed air foam systems in limited staffing conditions. New Jersey : *Morristown Fire Bureau*, 75. 112 c. [in Ukraine].
7. Kodryk, A. I. Titenko, O. M., Shakhov, S. M., Kurtov, O. V. (2019) Zalezhnist vlastyvostei kompresiinoi piny vid robochykh parametriv protsesu heneruvannia piny. *Naukovyi visnyk : Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka,* 1(7). K.: UkrNDICZ. S. 54– 63 [in Ukraine].
8. Abramov, Yu. A., Kyreev, A. A. (2015) Heleobrazuiushchye ohnetushashchye y ohnezashchytnыe sredstva povыshennoi эffektyvnosty prymenytelno k pozharam klassa A. Kharkov : NUHZU, 254 s. [in Ukraine].
9. Babenko, O. V. (2004) Vykorystannia yavyshcha heleutvorennia dlia pidvyshchennia efektyvnosti ridynnykh zasobiv pozhezhohasinnia : dys... kand. tekhn. nauk zi spetsialnosti «pozhezhna bezpeka» 21.06.02. *Akademiia tsyvilnoho zakhystu Ukrainy*. Kh., 225 ark. : rys., tabl. Bibliohr. : s. 134–148 [in Ukraine].
10. Lotov, V. A., Smyrnov, A. P., Lotova, L. H. (2006). Pat. 2275951 Rossyia MPK A62D 1/00 (01). Vodnыi rastvor dlia tushenyia pozharov / 09.11.2004 ; Opubl. 10.05.2006, Biul. № 13.
11. Yanc, A. I., Pavlov, M. M. ZHidkofaznie ognetushash'ie sostavi na osnove zhidkogo stekla. K voprosu primeneniya ognetushash'ih sostavov na osnove zhidkogo stekla pri tushenii lesnogo pozhara. Innovacionnaya nauka. Ufa, № 8. s. 28–29. *K voprosu prymenenyia ohnetushashchykh sostavov na osnove zhydkoho stekla pry tushenyy lesnoho pozhara* [in Ukraine].
12. Telichko E. V. Primenenie ognetushash'ih sostavov na osnove zhidkogo stekla. Informacionnie tehnologii (IT) v kontrole, upravlenii kachestvom i bezopasnosti : sbornik nauchnih trudov. VIII Mezhdunarodnoi konferencii shkolnikov, studentov, aspirantov, molodih uchenih «Resursoeffektivnie sistemi v upravlenii i kontrole: vzglyad v budush'ee», 7 – 12 oktiabria, Tomsk : Yzd-vo TPU, c. 305–309.
13. Gidrotermalnii sintez polisilikatov pri proizvodstve vspenennih vodostoikih materialov tipa $R_2O·n\ SiO_2$. I. M.Teresh'enko, O. B. Dormeshkin, A. P. Kravchuk, B. P. ZHih. Vesci naciyanalnai akademii navuk Belarusi. Seriya himichnih navuk. № 2. 2016.

14. Nauk. ker. Kodryk, A. I. (2021) Zvit pro naukovo-doslidnu robotu «Naukove obgruntuvannia pidvyshchennia efektyvnosti hasinnia pozhezh za rakhunok modyfikatsii skladiv vodnykh vohnehasnykh rechovyn ta sposobiv yikh podavannia», K. : IDU ND CZ DSNS Ukrainy. 239 s. [in Ukraine].
15. Ivchenko, O. A., Pankin, K. E. Tushenie lesnyh gorjuchih materialov gidrogeljami na osnove gidroksida aljuminija [Fire extingushing of forest flammable materials by hydrogels based on aluminum hydroxide]. *Lesotehnicheskij zhurnal [Foresty Engineering Journal],* Vol. 9, No. 1(33), p. 76–84. DOI : 10.12737.article_5c92016e1314b2.49705560.
16. Research of the extinguishing properties of water and hydrogel with carbon nanoparticles for liquidation burning of the petroleum products. *Pozharovzryvobezopasnost*. Ivanov A. V. [ta insh.]. Fire and Explosion Safety, 2017, vol. 26, no. 8, pp. 31–44 (in Russian). DOI : 10.18322/PVB.2017.26.08.31-44.
17. Khrystych, V. V., Maliarov, M. V., Bondarenko, S. M. (2013) Sovremennie sposobi povisheniya effektivnosti tusheniya pozhara raspilennoi vodoi. Problemi pozharnoi bezopasnosti. Harkov: NUHZU, vyp. 33. S. 176–182.
18. Kustov, M. V. (2009) Rozrobka vohnehasnoho skladu pidvyshchenoi efektyvnosti na osnovi vodnykh stabilizovanykh emulsii dlia hasinnia pozhezh klasu «A» : Avtoref. dys. kand. t.n. : 21.06.02. Kustov, M. V. ; Kharkiv, 2009. 24. [in Ukraine].
19. Zhartovskyi, S. V. (2016) Vyiavlennia vplyvu khimichnoho skladu vodnykh vohnehasnykh rechovyn na osnovi Na2SiO3 ta K2CO3 na yikh vohnehasnu efektyvnist pid chas hasinnia vohnyshch klasu A. *Teoriia i praktyka hasinnia pozhezh ta likvidatsii nadzvychainykh sytuatsii : Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia*, Cherkasy, 8–11 veresnia. 46–49 [in Ukraine].
20. Zhartovskyi, C. V., Nizhnyk, V. V., Sizikov O. O., Ballo, Ya.V., Benediuk, V. S. (2016) Doslidzhennia efektyvnosti tonkorozpylenoi vodnoi vohnehasnoi rechovyny z tsilovymy dobavkamy. S. V. Zhartovskyi. Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia *«Pozhezhna ta tekhnohenna bezpeka. Teoriia, praktyka, innovatsii».* Lviv. S. 158–162. [in Ukraine].
21. Koziar, N. M. (2009) Pidvyshchennia efektyvnosti zastosuvannia vodnykh ta vodopinnykh vohnehasnykh rechovyn : avtoref. dys. na zdobuttia nauk. stupenia kand. tekhn. nauk : spets. 21.06.02 «*Pozhezhna bezpeka*». Kyiv. 23 c. [in Ukraine].
22. Sizikov, O. O. (2017) Vplyv tsilovykh dobavok do vody na efektyvnist hasinnia pozhezh tverdykh rechovyn. Naukovyi visnyk Nats. lisotekhn. un-tu Ukrainy. Lviv. T. 26, № 8. C. 293–303 [in Ukraine].

## WAYS OF INCREASING THE EFFECTIVENESS OF AQUEOUS FIRE EXTINGUISHING AGENT BASED ON LIQUID GLASS

*A. Kodryk, V. Kovalenko, O. Titenko, A. Borysov, I. Stylyk, A. Borysova*

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

KEYWORDS:

aqueous fire extinguishing agents; modification; cooling, dilution; inhibition; ignition time; stop of burning; extinguishing efficiency

ANNOTATION

The peculiarities of interaction of aqueous fire extinguishing substances with combustible medium and combustible surfaces as a basis for improving the quality of existing and developing new modern samples of water extinguishing agents with using modern gelling compounds based on liquid glass, as well as increasing fire extinguishing efficiency during using in fire protection systems of facilities and firefighting were considered. The results of laboratory and field testing which prove the expediency of combining the components of liquid sodium glass and potash in the composition of fire-extinguishing gelling compounds are proved. Ways to improve the composition of aqueous fire extinguishing substances and technologies for their application are offered. The current state of the availability and trends of development in the world and domestic practice of fire extinguishing substances and technologies for their use is analyzed. Possible ways to improve recipes and increase the efficiency of fire extinguishing substances are outlined, taking into account, first of all, the criteria of efficiency, economy and environmental friendliness. It is proved that in comparison with water fire extinguishing solutions on the basis of modified systems and new technologies of their production have a number of advantages, which are a significant increase in their stability and adhesive properties, increased fire-retardant effect due to the formation of a porous layer or film, which complicates the ignition and protects the combustible material due to its low thermal conductivity and isolation from oxygen access, which is important in extinguishing surface fires of class A. Based on the analysis of literature sources, as well as their own theoretical and experimental research, the scientific basis for further scientific and technological progress in the practice of producers and consumers of firefighting products has been accumulated.

*УДК 355.58.001, 351.862.001*

# МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ НЕОБХІДНОГО СКЛАДУ ТИПОВИХ ОРГАНІЗАЦІЙНИХ СТРУКТУР ЄДИНОЇ ДЕРЖАВНОЇ СИСТЕМИ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ НА ДОВГОСТРОКОВУ ПЕРСПЕКТИВУ

*https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.1.35-46*

Михайлова А. В., ORCID iD 0000-0001-9440-4417
E-mail: mikhailovaav86@gmail.com

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

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

*Надійшла до редакції: 31.01.2022*
*Пройшла рецензування: 24.05.2022*

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

сектор безпеки та оборони; огляд сектору безпеки; планування; Єдина державна система цивільного захисту; надзвичайна ситуація; типова організаційна структура; довгострокова перспектива; метод

АНОТАЦІЯ

У публікації здійснено аналіз статистичної інформації про надзвичайні ситуації в Україні, що сталися впродовж останніх десяти років. Отримані висновки підтвердили актуальність та необхідність проведення заходів щодо оцінювання наявних і визначення необхідних сил та засобів цивільного захисту, а також оцінювання запланованого й необхідного рівня державного фінансування. На сьогодні одним із дієвих варіантів зміни стану щодо кількості виникнення надзвичайних ситуацій та масштабів їх наслідків (як людських жертв, так і матеріальних втрат) є перехід до процедури планування на основі спроможностей. Дослідження та запровадження такого підходу також сприятиме інтеграції нашої держави до Європейського Союзу. Метою цієї статті є розроблення методу визначення необхідного складу типових організаційних структур єдиної державної системи цивільного захисту на довгострокову перспективу для належного виконання завдань за визначеними сценаріями виникнення ймовірних надзвичайних ситуацій за умов мінімізації обсягів фінансових ресурсів. Для досягнення поставленої мети, а також для вивчення досвіду країн Північноатлантичного Альянсу, Європейського Союзу та здобутків нашої держави за напрямом розвитку сектора безпеки і оборони було проведено аналітичний огляд нормативно-правової бази і результатів наукових досліджень закордонних та вітчизняних вчених. За результатами досліджень запропоновано метод визначення необхідного складу типових організаційних структур єдиної державної системи цивільного захисту на довгострокову перспективу для належного виконання завдань за визначеними сценаріями виникнення ймовірних надзвичайних ситуацій за умов встановлення мінімально необхідних ресурсів сектору безпеки, в чому й полягає наукова новизна проведеної роботи.

**Постановка проблеми.** Аналіз статистичних даних, наведених у [1–11], свідчить, що упродовж останніх десяти років, незважаючи на превентивні заходи Державної служби України з надзвичайних ситуацій (далі – ДСНС) з недопущення виникнення надзвичайних ситуацій різного характеру (далі – НС) та мінімізації їх наслідків, суттєвого покращення стану безпеки населення не відбулось, а матеріальні збитки склали 33 585,4 млн грн (табл. 1).

*Таблиця 1* – Основні показники виникнення НС в Україні за 2012–2021 рр.

| | Інформація про НС | | | |
|---|---|---|---|---|
| Рік | Кількість НС | Кількість загиблих осіб | Кількість постраждалих осіб | Матеріальні збитки, млн грн |
| 2021 | 124 | 148 | 545 | 660,05 |
| 2020 | 116 | 170 | 1026 | 28262,71 |
| 2019 | 146 | 200 | 1492 | 1625,87 |
| 2018 | 128 | 168 | 839 | 496,97 |
| 2017 | 166 | 172 | 892 | 896,8 |
| 2016 | 149 | 183 | 1805 | 265,31 |
| 2015 | 148 | 242 | 962 | 532,72 |
| 2014 | 143 | 287 | 680 | 198,85 |
| 2013 | 144 | 253 | 854 | 396,33 |
| 2012 | 212 | 301 | 861 | 249,79 |
| Загалом за 10 років | 1476 | 2127 | 9956 | 33585,4 |

*Узагальнено автором (за інформацією з офіційного сайту ДСНС)*

З огляду на зазначене виникає певна стурбованість, що спонукає до впровадження комплексу заходів на основі проведення наукових досліджень. Зокрема, за результатами оцінювання ризиків виникнення НС з'являється можливість створення умов для забезпечення ефективного стану готовності єдиної державної системи цивільного захисту (далі – ЄДСЦЗ). Своєю чергою процедура оцінювання ризиків виникнення НС потребує здійснення оцінки таких складових, як: аналіз спроможностей наявних сил та засобів цивільного захисту; визначення необхідних сил та засобів цивільного захисту; запланований рівень державного фінансування; визначення необхідного рівня фінансування.

З метою набуття навичок стосовно кращих практик запобігання виникненню НС та ліквідації їх наслідків, досягнення безпекового середовища та сумісності з європейськими безпековими інститутами нині в Україні здійснюється перехід до процедури планування на основі спроможностей, що застосовується в Європейському Союзі [12].

У зв'язку з цим у Раді національної безпеки і оборони України було ухвалено рішення щодо здійснення організації планування в секторі безпеки і оборони України [13]. Відповідно до рішення визначено ряд завдань щодо проведення оглядів у секторі безпеки і оборони, зокрема у сфері громадської безпеки та цивільного захисту. Також у [12] окреслено, що до складу сектору безпеки і оборони входять сили цивільного захисту.

Згідно з [14–15] реалізація державної політики у сфері цивільного захисту провадиться ЄДСЦЗ, безпосереднє керівництво якою здійснює ДСНС. Тобто для відповідних фахівців ДСНС «огляд сектору безпеки» полягає у проведенні огляду спроможностей ЄДСЦЗ, процедура якого визначена у [16].

Однак досвід фахівців сфери цивільного захисту за зазначеним напрямом діяльності досить незначний, тоді як, наприклад, у Міністерстві оборони України (далі – Міноборони) у 2020 р. був проведений огляд сектору оборони, за результатами якого затверджено звіт, котрий набув чинності відповідно до Указу Президента України [17].

Зважаючи на наведене вище, у науковій статті пропонується використати досвід, набутий фахівцями Міноборони, та розробити метод визначення необхідного складу типових організаційних структур (далі – ТОС) ЄДСЦЗ на довгострокову перспективу для виконання повного обсягу завдань за окресленими сценаріями виникнення ймовірних надзвичайних ситуацій за умов мінімізації обсягів фінансових ресурсів.

Водночас поняття «необхідний склад ТОС» – це такий склад сил та засобів підрозділів ЄДСЦЗ (наявних та тих, що можуть бути створені), який необхідний для виконання всіх завдань за призначенням, покладених на ДСНС.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Нині питання ефективного розвитку європейського сектору безпеки є актуальними, що підтверджується, зокрема, низкою проведених досліджень в різних державах. У країнах Європейського Союзу та Північноатлантичного альянсу це питання досліджували, зокрема, такі вчені: В. Ф. ван Ікелен, Т. Тагарев, Я. А. Трапанс, Г. Фрорат, Х. Букур-Марку, Дж. Тредденік, Е. Лоуренс та інші. Так, у [18] висвітлено питання формування політики безпеки, в [19] наголошено на важливості впровадження європейської норми парламентського контролю на всю державницьку діяльність, зокрема щодо бюджетних асигнувань в секторі безпеки, котрі базуються на таких обов'язкових принципах, як підзвітність, нагляд та прозорість. У [20] визначено терміни проведення оборонного планування й наведено відповідні їм процедурні особливості, а в [21] йдеться про важливість професійного кризового управління у питаннях забезпечення національної безпеки. Питання фінансової складової у сфері безпеки і оборони досліджено у [22–24]. У цих роботах також наголошується, що державні органи влади, в межах компетенції яких є прийняття відповідних концепцій щодо обсягів та пріоритетів фінансування, мають нести відповідальність за їх упровадження й подальше виконання; підкреслено важливість належного стабільного фінансування упродовж тривалого терміну та налагодженої системи управління ресурсами, оскільки без цього ефективне виконання запланованих концепцією заходів є неможливим. У [25–26] зосереджено увагу на питаннях кадрового менеджменту сектору безпеки та оборони. Автор визначає, що чисельність та структура персоналу залежать від таких факторів: стан міжнародної безпеки, здатність сектору безпеки і оборони адекватно реагувати на загрози, рівень сил та засобів, а також фінансові можливості. Питання необхідності забезпечення відповідними засобами й визначення їх кількості досліджено у [27], де наведено приклади процесів, пов'язаних з ухваленням рішень до початку проведення заходів із закупівлі, а також розглянуто стратегії й етапи закупівельної діяльності.

У нашій країні активно розвивається нормативно-правова база щодо визначення й затвердження понятійного апарату, а також розроблення організаційних та процедурних заходів щодо забезпечення планування сектору безпеки і оборони [12– 17; 38–40]. Значна кількість вітчизняних науковців зосереджує свій науковий інтерес на цьому напрямі, а саме: В. Биченков, Б. Ворович, А. Іващенко, Л. Калиненко, В. Калмиков, В. Коробкін, О. Левчук, М. Лобко, О. Малишев, Н. Малишева, О. Морохов, Ю. Мудрак, А. Наливайко, В. Фролов, В. Павленко, А. Павліковський, А. Пушняков, А. Поляєв, Ф. Саганюк, В. Семененко, І. Сівоха, А. Слюсар, О. Сурков, А. Фучко, О. Устименко та інші.

Так, авторський колектив у монографії [28] виклав підходи щодо вирішення сучасних проблем розвитку сил безпеки і оборони та їх спроможностей як складових сектору безпеки і оборони України. У [29] окреслено варіанти сьогочасних підходів щодо впровадження оперативних стандартів, які легалізовані в арміях держав-учасниць НАТО, з метою їх можливої імплементації під час проведення оборонної реформи в Україні. У [30] здійснюється аналіз концепції планування на основі розвитку спроможностей сил оборони, зокрема основні проблеми її впровадження. У [31] пропонується методичний підхід до формалізації стратегічного планування розвитку спроможностей Збройних Сил України та інших складових сил оборони. У [32] автор досліджує процес оборонного планування у країнах, що входять до складу

Північноатлантичного альянсу, на основі спроможностей, розглядаючи при цьому можливість застосування такого підходу у сфері забезпечення безпеки державного кордону України. У [33] наведено результати проведеного аналізу правової складової сучасного стану інституту оборонного планування в Україні на основі спроможностей, а також розглянуто перспективи його розвитку. У [34] колектив авторів пропонує заходи для впровадження системного підходу оборонного управління у складових силах оборони України з метою вдосконалення оборонної реформи шляхом наближення до стандартів НАТО. В [35–36] вивчено питання оцінювання спроможностей цивільного захисту, підготовки рекомендацій щодо їх впровадження, наведено пропозиції щодо визначення сутності поняття «спроможності» у сфері цивільного захисту та пов'язаних із ним термінів.

**Формулювання цілей досліджень.** За результатами проведеного аналітичного дослідження метою цієї статті є розроблення методу визначення необхідного складу типових організаційних структур єдиної державної системи цивільного захисту на довгострокову перспективу для належного виконання завдань за певними сценаріями виникнення ймовірних надзвичайних ситуацій за умов мінімізації обсягів фінансових ресурсів, що дасть можливість підвищити рівень функціонування ДСНС через упровадження стандартів Європейського Союзу.

**Методи дослідження.** Під час підготовки публікації використано метод теоретичних досліджень, а саме – такі його складові: аналіз (під час дослідження особливостей та специфіки питання планування сектору безпеки і оборони), синтез (під час встановлення складових сектору безпеки і оборони та визначення їх взаємозв'язку), порівняння і систематизація (під час визначення загальних правил функціонування ТОС ЄДСЦЗ та їх особливостей).

**Виклад основного матеріалу дослідження.** З огляду на можливість урахування досвіду Міноборони щодо порядку проведення оборонного огляду [37] пропонується розробити метод визначення необхідного складу ТОС ЄДСЦЗ на довгострокову перспективу.

Поняття довгострокової перспективи визначено у [12] й становить понад п'ять років. Зазвичай ідеться про термін в 10 років (дві каденції Президента).

За аналогією з [37] огляд спроможностей ЄДСЦЗ може бути проведений в три етапи, а саме: організаційно-підготовчий, основний та підсумковий. Основний його етап полягає у проведенні чотирьох фаз, а саме: оцінювання стану та перспектив розвитку безпекового середовища; огляд спроможностей за їх функціональними групами і планування сил; планування ресурсів; формування перспективної моделі ЄДСЦЗ та її структури.

Огляд спроможностей ЄДСЦЗ полягає у визначенні сил та засобів, необхідних для виконання завдань на державному, регіональному, місцевому та об'єктовому рівнях.

Зважаючи на досвід Міноборони, визначення складу ТОС ЄДСЦЗ полягає у послідовному виконанні таких дій:

- визначення варіантів перспективних ТОС, котрі здатні вирішувати типові завдання (далі – ТЗ) за ймовірним сценарієм виникнення НС. Для розв'язання цієї задачі спочатку проводиться процедура оцінювання відповідності наявних ТОС типовим завданням за ймовірним сценарієм виникнення НС, після чого визначаються варіанти перспективних ТОС, здатних вирішувати ТЗ за ймовірним сценарієм виникнення НС;

- визначення раціональної перспективної ТОС (далі – ПТОС) зі складу запропонованих варіантів ПТОС. Водночас проводиться оцінювання ефективності виконання ТЗ за сценарієм з урахуванням наявного складу та визначення необхідного фінансового ресурсу для створення ПТОС.

Вхідними даними для вирішення завдання з визначення необхідного складу ТОС ЄДСЦЗ на довготривалу перспективу пропонуються:

- варіанти сценаріїв, які потребують виконання типових завдань за призначенням складовими ЄДСЦЗ. Варіанти сценаріїв – це ймовірні НС, що формулюються за результатами оцінювання загроз, які можуть виникнути у визначеній перспективі (довгостроковій, середньостроковій, короткостроковій);

- перелік ТЗ, які необхідно виконати для вирішення кожного варіанта сценарію – (ліквідації НС) ($Z_i$), де $i$ – порядковий номер ТЗ. Перелік ТЗ для кожного варіанта сценарію визначають різні спроможності, що необхідні для забезпечення їх виконання;

- важливість виконання кожного ТЗ для позитивного вирішення сценарію загалом ($W_i$), де $i$ – порядковий номер ТЗ;

- варіанти реалізації кожного ТЗ з метою ліквідації НС ($V_{ij}$), де $j$ – порядковий номер варіанта його виконання. Для кожного варіанта сценарію можуть бути розроблені альтернативні варіанти рішень, відповідно до яких різні варіанти спроможностей застосовуються для реалізації кожного ТЗ. Крім цього, проводиться оцінювання вартісних показників;

- кількість сил зі складу ТОС (кількість необхідних сил, а саме: підрозділів управління, застосування, забезпечення та підготовки фахівців);

- кількість наявних підрозділів у складі ТОС, що згруповані за чотирма визначеними функціональними складовими (управління, застосування, забезпечення, підготовка) ($ТОС_{kg}$), де $k$ – номер функціональної групи, $g$ – номер ТОС у функціональній групі.

*Таблиця 2* – Відповідність ТОС ЄДСЦЗ типовим завданням за ймовірним сценарієм виникнення НС (шаблон)

| Функціональні складові | Типові організаційні структури, ТОС | | Типові завдання, ТЗ | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Типові завдання, ТЗ | $Z_1$ | | | … | | … | $Z_i$ |
| | | Важливість ТЗ | $W_1$ | | | … | | … | $W_i$ |
| | | Кількість необхідних сил | $V_{11}$ | … | $V_{1j}$ | … | … | … | $V_{ij}$ |
| Управління | $ТОС_{11}$ | | | | | | | | |
| | … | | | | | | | | |
| | $ТОС_{1g}$ | | | | | | | | |
| Застосування | $ТОС_{21}$ | | | | | | | | |
| | …. | | | | | | | | |
| | $ТОС_{2g}$ | | | | | | | | |
| Забезпечення | $ТОС_{31}$ | | | | | | | | |
| | … | | | | | | | | |
| | $ТОС_{3g}$ | | | | | | | | |
| Підготовка | $ТОС_{41}$ | | | | | | | | |
| | … | | | | | | | | |
| | $ТОС_{4g}$ | | | | | | | | |

*Джерело:* розроблено автором

Із застосуванням зазначених вище вхідних даних здійснюється формування відповідної таблиці (табл. 2).

Оцінювання відповідності ТОС ЄДСЦЗ типовим завданням за кожним імовірним сценарієм виникнення НС проводиться із використанням методів системного аналізу. За результатами проведених розрахунків визначаються ТОС з надлишковими спроможностями,

неперспективні ТОС, а також такі ТЗ, забезпечити виконання яких наявними спроможностями не можна. Ця інформація дає змогу ухвалювати відповідні управлінські рішення, а саме: підтримувати ТОС, які існують, удосконалювати шляхом нарощування основних її компонентів (сил та засобів), формувати нові перспективні ТОС та/або позбавлятися надлишкових неперспективних ТОС.

З метою реалізації процедури оцінки вартості створення та утримання необхідного складу ТОС ЄДСЦЗ для виконання завдань за сценаріями розробляються таблиці за кожною функціональною групою (табл. 3, на прикладі функціональної групи «Застосування»). У кожній з цих таблиць наводиться інформація щодо вартості можливих управлінських заходів з ТОС, а саме: вартість утримання ТОС, які існують; вартість створення ПТОС; вартість скорочення наявних надлишкових неперспективних ТОС та вартість реорганізації наявних надлишкових неперспективних ТОС до стану перспективних.

*Таблиця 3* – Визначення необхідного фінансового ресурсу для ТОС функціональної групи «Застосування» за визначеними станами (у.о.) (шаблон)

| Типові організаційні структури, ТОС | Утримання | Скорочення | $ТОС_{21}$ | ... | $ТОС_{2g}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| $ТОС_{21}$ | | | | | |
| …. | | | | | |
| $ТОС_{2g}$ | | | | | |

*Джерело:* розроблено автором

Примітка: у стовпчику «Утримання» визначається вартість щорічного утримання ТОС; у стовпчику «Скорочення» – вартість проведення скорочення ТОС; в решті стовпчиків – сірим кольором виділено позиції, в яких розміщується інформація щодо створення ТОС, білим кольором виділено вартість реорганізації ТОС з одного типу в ТОС іншого типу.

Визначення необхідного складу ТОС ЄДСЦЗ на довгострокову перспективу за можливими варіантами сценаріїв полягає у здійсненні пошуку такого його складу, який буде здатний за своїми спроможностями вирішувати всі ТЗ за кожним сценарієм виникнення ймовірної НС. Перспективним вважається такий склад ТОС ЄДСЦЗ, який при цьому потребує мінімального фінансового забезпечення.

Для визначення ПТОС необхідно враховувати такі умови:

- сценарії виникнення ймовірної НС не можуть з’являтися одночасно. В іншому разі ці сценарії об’єднуються в єдиний комбінований сценарій;

- перелік ТЗ за сценарієм виникнення ймовірної НС необхідно вирішити за будь-яким можливим варіантом.

Під час проведення розрахунку вартості реалізації кожного варіанта ТЗ варто враховувати ряд умов, а саме:

- ТОС, які існують, необхідно утримувати весь період до наступного визначеного терміну проведення планування сил і засобів ТОС ЄДСЦЗ в секторі безпеки України;

- вартість ПТОС, які необхідно створити, розраховується з огляду не лише на вартість їх створення, а й подальше утримання. Водночас вартість утримання ПТОС становить пів терміну від повного терміну;

- вартість надлишкових неперспективних ТОС, щодо яких ухвалено рішення про ліквідування, розраховується як сума витрат на вартість скорочення ТОС і вартість пів терміну його утримання;

- вартість надлишкових неперспективних ТОС, щодо яких ухвалено рішення про створення ПТОС, розраховується як сума вартості реорганізації неперспективної ТОС в перспективну, вартість пів терміну

утримання неперспективної ТОС і пів терміну утримання ПТОС.

Згідно з порядком проведення розрахунків, наведених в [37], пропонується послідовне виконання таких дій:

- пошук варіанта найбільш раціонального використання ТОС ЄДСЦЗ, який існує, й оцінювання його ефективності;

- визначення необхідного складу ТОС ЄДСЦЗ, що здатен забезпечувати виконання всіх ТЗ за сценарієм імовірного виникнення НС. Водночас ця ТОС повинна бути найменш ресурсоємною під час його створення та утримання;

- визначення перспективи розвитку ТОС за функціональними складовими (управління, застосування, забезпечення, підготовка).

З метою пошуку варіанта найбільш раціональної ПТОС використання наявних сил та засобів ЄДСЦЗ та оцінки його ефективності формується табл. 4. Під час її заповнення враховується кількість підрозділів ТОС, які існують. Внаслідок проведених розрахунків у ній наводиться раціональний варіант розв'язання ТЗ.

Оцінка ефективності виконання завдань за сценарієм проводиться з урахуванням наявного складу сил ТОС (*E*) та вартості необхідних ресурсів для реалізації сценарію виникнення ймовірної НС (*S*). Водночас основним є показник ефективності виконання всіх ТЗ за сценарієм. У разі рівності варіантів за цим показником для надання переваги одному з них використовується додатковий показник - вартість розв'язання ТЗ за сценарієм виникнення ймовірної НС, що враховує вартість утримання ТОС, які беруть участь у плануванні, виконанні, забезпеченні та підготовці фахівців.

*Таблиця 4* – Оцінка ефективності виконання типових завдань за сценарієм з урахуванням наявного складу (шаблон)

| Функціональні складові | Типові організаційні структури, ТОС | | Типові завдання, *mз* | | | | Потрібно підрозділів |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Типові завдання, ТЗ | $ТЗ_1$ | … | … | $ТЗ_n$ | |
| | | Важливість ТЗ | $W_1$ | … | … | $W_i$ | |
| | | Варіанти ТЗ | $V_{1j}$ | ... | ... | $V_{ij}$ | |
| Управління | $ТОС_{11}$ | | | | | | |
| | … | | | | | | |
| | $ТОС_{1g}$ | | | | | | |
| Застосування | $ТОС_{21}$ | | | | | | |
| | …. | | | | | | |
| | $ТОС_{2g}$ | | | | | | |
| Забезпечення | $ТОС_{31}$ | | | | | | |
| | … | | | | | | |
| | $ТОС_{3g}$ | | | | | | |
| Підготовка | $ТОС_{41}$ | | | | | | |
| | … | | | | | | |
| | $ТОС_{4g}$ | | | | | | |
| Вартість / ефективність | *S* | *E* | | | | | |

*Джерело:* розроблено автором

Примітка: сірим кольором у таблиці визначено раціональні варіанти вирішення типових завдань

Під час визначення необхідного складу ТОС ЄДСЦЗ, здатного виконувати всі ТЗ за сценарієм виникнення ймовірної НС, основним є показник вартості. Він враховує загальну вартість утримання, створення, реорганізації, ліквідування підрозділів ТОС ЄДСЦЗ як наявних, так і перспективних, таких, які здатні вирішити

всі завдання за сценарієм (тобто ефективність застосування ТОС ЄДСЦЗ = 1). Водночас вигляд таблиці залишається незмінним (див. табл. 3).

Для встановлення перспективи розвитку ТОС за визначеними функціональними складовими формуються відповідні таблиці з інформацією про створення необхідного складу цих структур. Вони є додатковими й призначені для розкриття змісту вирішення завдання щодо створення необхідного складу ТОС ЄДСЦЗ, який здатний виконати всі поставленні ТЗ за сценаріями виникнення ймовірної НС. Зазначена таблиця за виглядом аналогічна таблиці «Визначення необхідного фінансового ресурсу для ТОС» (див. табл. 3), але замість фінансового ресурсу в ній наводиться інформація про кількість ТОС, які повинні утримуватись, скорочуватись, створюватись чи реорганізовуватись.

**Висновки та напрями подальших досліджень.** Актуальність поставленого завдання щодо необхідності розроблення науково-методичного апарату ефективного розвитку єдиної державної системи цивільного захисту підтверджується статистичним аналізом даних про виникнення надзвичайних ситуацій за 2012–2021 рр. Здійснено аналітичний огляд нормативно-правової бази та результатів наукових досліджень закордонних і вітчизняних вчених. Уперше запропоновано метод визначення необхідного складу типових організаційних систем єдиної державної системи цивільного захисту на довгострокову перспективу для належного виконання завдань за певними сценаріями виникнення ймовірної надзвичайної ситуації за умов використання мінімально необхідного обсягу ресурсів. Надалі передбачається здійснення апробації запропонованого методу на основі реальних даних.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ


1. Інформаційно–аналітична довідка про виникнення НС в Україні у 2020 році. URL : https://www.dsns.gov.ua/ua/Dovidka-za-kvartal/119288.html (дата звернення : 05.09.2021).
2. Інформаційно–аналітична довідка про виникнення НС в Україні упродовж 2019 року. URL : https://www.dsns.gov.ua/ua/Dovidka-za-kvartal/103179.html (дата звернення : 05.09.2021).
3. Інформаційно-аналітична довідка про виникнення надзвичайних ситуацій в Україні у 2018 році. URL : https://www.dsns.gov.ua/ua/Dovidka-za-kvartal/87968.html (дата звернення : 05.09.2021).
4. Інформаційно–аналітична довідка про виникнення надзвичайних ситуацій в Україні у 2017 році. URL : https://www.dsns.gov.ua/ua/Dovidka-za-kvartal/72899.html (дата звернення : 05.09.2021).
5. Звіт про основні результати діяльності Державної служби України з надзвичайних ситуацій у 2016 році. URL : https://www.dsns.gov.ua/files/2017/2/22/2016.pdf (дата звернення : 06.09.2021).
6. Інформаційно-аналітична довідка про надзвичайні ситуації в Україні, що сталися впродовж 2015 року. URL : https://www.dsns.gov.ua/ua/Dovidka-za-kvartal/44615.html (дата звернення : 06.09.2021).
7. Інформаційно–аналітична довідка про надзвичайні ситуації в Україні, що сталися впродовж 2014 року. URL : https://www.dsns.gov.ua/ua/Dovidka-za-kvartal/43867.html (дата звернення : 06.09.2021).
8. Інформаційно–аналітична довідка про виникнення НС в Україні протягом 2013 року. URL : https://www.dsns.gov.ua/ua/Dovidka-za-kvartal/43123.html (дата звернення : 06.09.2021).
9. Інформаційно–аналітична довідка про надзвичайні ситуації, що виникли на території України протягом 2012 року. URL : https://www.dsns.gov.ua/ua/Dovidka-za-kvartal/42377.html (дата звернення : 06.09.2021).
10. Аналіз виникнення надзвичайних ситуацій в Україні протягом 2011 року. URLи: https://www.dsns.gov.ua/ua/Dovidka-za-kvartal/41629.html (дата звернення : 06.09.2021).
11. Аналіз виникнення надзвичайних ситуацій в Україні за 2010 рік. URL : https://www.dsns.gov.ua/ua/Dovidka-za-kvartal/41063.html (дата звернення : 08.09.2021).
12. Про національну безпеку України : Закон України від 21.06.2018 р. № 2469-VIII. URL : https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2469-19 (дата звернення : 06.09.2021).
13. Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 16.05.2019 р. «Про організацію планування в секторі безпеки і оборони України» : Указ Президента України від 16.05.2019 р. № 225/2019. URL : https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/225/2019 (дата звернення : 06.09.2021).
14. 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/card/5403-17 (дата звернення : 20.08.2021).
15. Про затвердження Положення про єдину державну систему цивільного захисту : постанова Кабінету Міністрів України від 09.01.2014 р. № 11. URL : https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/11-2014-%D0%BF#Text (дата звернення : 01.10.2021).
16. Про затвердження Порядку проведення огляду громадської безпеки та цивільного захисту Міністерством внутрішніх справ : постанова Кабінету Міністрів України від 22.05.2019 р. № 507. URL : https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/507-2019-%D0%BF#Text (дата звернення : 29.10.2021).

17. Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 24 березня 2020 року «Про звіт щодо результатів проведення оборонного огляду Міністерством оборони України» : Указ Президента України від 24.03.2020 р. № 106/2020. URL : https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/106/2020 (дата звернення : 13.09.2021).
18. Ван Иикелен В. Ф. Отношение между гражданской и военной властями и формирование политики безопасности. *Сборник материалов Плана партнерских действий по созданию институтов обороны и безопасности (PAP-DIB) «Построение обороны и безопасности»*. 2007. С. 94–116.
19. Ван Иикелен В. Ф. Законодательный надзор над сектором безопасности. *Сборник материалов Плана партнерских действий по созданию институтов обороны и безопасности (PAP-DIB) «Построение обороны и безопасности».* 2007. С. 117–136.
20. Тагарев Т. Оборонное планирование – ключевые процессы оборонного менеджмента. *Оборонный менеджмент : ознакомление. Серия «Менеджмент безопасности и обороны»*. 2011. № 1. С. 41–68.
21. Трапанс Я. А. Угрозы и безопасность. *Сборник материалов Плана партнерских действий по созданию институтов обороны и безопасности (PAP-DIB) «Построение обороны и безопасности»*. 2007. С. 137–153.
22. Фрорат Г. Менеджмент финансов. *Оборонный менеджмент : ознакомление. Серия : «Менеджмент безопасности и обороны»*. 2011. № 1. С. 87–118.
23. Трапанс Я. А. Демократия, безопасность и оборонное планирование. *Сборник материалов Плана партнерских действий по созданию институтов обороны и безопасности (PAP-DIB) «Построение обороны и безопасности»*. 2007. С. 154–171.
24. Букур-Марку Х. Финансовое планирование и распределение ресурсов в сфере обороны. *Сборник материалов Плана партнерских действий по созданию институтов обороны и безопасности (PAP-DIB) «Построение обороны и безопасности»*. 2007. С. 209–224.
25. Тредденик Дж. Менеджмент людских ресурсов. *Оборонный менеджмент : ознакомление. Серия : «Менеджмент безопасности и обороны»*. 2011. № 1. С. 119–152.
26. Молнар Ф. Принципы и практика кадровой политики на примере Сил обороны Венгрии. *Сборник материалов Плана партнерских действий по созданию институтов обороны и безопасности (PAP-DIB) «Построение обороны и безопасности»*. 2007. С. 193–208.
27. Лоуренс Э. Менеджмент в сфере закупочной деятельности. *Оборонный менеджмент : ознакомление. Серия : «Менеджмент безопасности и обороны»*. 2011. № 1. С. 153–190.
28. Сектор безпеки і оборони України: теорія, стратегія, практика : Монографія / Ф. В. Саганюк, В. С. Фролов, О. В. Устименко , М. М. Лобко та ін. Київ : Академпрес, 2017. 180 с.
29. Фролов В. С., Саганюк Ф. В. Системний підхід до реалізації оборонної реформи в Україні. *Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України імені Івана Черняховського*. 2018. № 1(62). С. 13–18. URL : https://doi.org/10.33099/2304-2745/2018-1-62/13-18 (дата звернення : 27.09.2021).
30. Іващенко А. М., Павліковський А. К., Сівоха І. М. Концепція оборонного планування на основі розвитку спроможностей : проблеми впровадження. *Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України імені Івана Черняховського*. 2017. № 1(59). С. 53–58. URL : https://doi.org/10.33099/2304-2745/2017-1-59/53-58 (дата звернення : 27.09.2021).
31. Сурков О. О. Методичний підхід до формалізації стратегічного планування розвитку спроможностей Збройних Сил та інших складових сил оборони. *Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України імені Івана Черняховського*. 2018. № 1. С. 34–40. URL : http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpcvsd_2018_1_7 (дата звернення : 27.09.2021).
32. Морохов О. О. Досвід НАТО щодо оборонного планування на основі спроможностей : можливості його застосування у сфері забезпечення безпеки державного кордону України. *Державне управління у сфері державної безпеки та охорони громадського порядку*. 2019. № 13. С. 127–130. URL : https://doi.org/10.32843/2663-5240-2019-13-24 (дата звернення : 30.09.2021).
33. Оборонне планування на основі спроможностей в Україні : поточний стан і перспективи / О. В. Малишев та ін. *Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України імені Івана Черняховського*. 2020. 3 (70). С. 54–61. URL : https://doi.org/10.33099/2304-2745/2020-3-70/54-61 (дата звернення : 29.09.2021).
34. Оборонна реформа: системний підхід до оборонного менеджменту : монографія / А. Павліковський ,та ін. ; за заг. ред. док. військ. наук А. Сиротенка. Київ : НУОУ, 2020. 274 с.
35. Спроможності у сфері цивільного захисту / Л. Калиненко та ін. *Науковий вісник : цивільний захист та пожежна безпека.* 2020. № 1(9). С. 4–13. URL : https://doi.org/10.33269/nvcz.2020.1.4-13. (дата звернення : 01.09.2021).
36. Коробкін В., Слюсар А. Спроможності у сфері цивільного захисту: пошук категоріально-понятєвого апарату. *Науковий вісник : цивільний захист та пожежна безпека*. 2020. № 2(10). С. 61–68. URL : https://doi.org/10.33269/nvcz.2020.2.61-68 (дата звернення : 01.09.2021).
37. Про затвердження порядку проведення оборонного огляду в Міністерстві оборони : постанова Кабінету Міністрів України від 31.10.2018 р. № 941. URL : https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/941-2018-%D0%BF (дата звернення : 12.09.2021).
38. Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 14.09.2020 р. «Про Стратегію національної безпеки України» : Указ Президента України від 14.09.2020 р. № 392/2020. URL : https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/392/2020 (дата звернення : 10.09.2021).
39. Проєкт Стратегії громадської безпеки та цивільного захисту України. URL : https://mvs.gov.ua/uk/ministry/proekti-normativnix-aktiv/strategiya-gromadskoyi-bezpeki-ta-civilnogo-zaxistu-ukrayini-zatverdzeno-vid-29062021 (дата звернення : 09.09.2021).
40. Биченков В. В., Михайлова А. В. До питання розроблення алгоритму визначення необхідного складу організаційних структур Державної служби України з надзвичайних ситуацій на довгострокову перспективу. *Спроможності функціональних та територіальних підсистем ЄДСЦЗ для оперативного розв'язання завдань за призначенням :* матеріали 22-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції (за міжнародною участю) (27 жовт.2021 р., м. Київ). Київ : ІДУ НД ЦЗ, 2021. С. 20–27.

## REFERENCES


1. Informatsiino–analitychna dovidka pro vynyknennia NS v Ukraini u 2020 rotsi. Retrieved from : https://www.dsns.gov.ua/ua/Dovidka-za-kvartal/119288.html. [Information and analytical report on the emergence of emergencies in Ukraine in 2020] (data zvernennia : 05.09.2021) [in Ukrainian].
2. Informatsiyno–analitichna dovIdka pro viniknennya NS v Ukrayini uprodovzh 2019 roku. Retrieved from : https://www.dsns.gov.ua/ua/Dovidka-za-kvartal/103179.html. [Information and analytical report on the occurrence of emergencies in Ukraine during 2019]. (data zvernennia : 05.09.2021) [in Ukrainian].
3. Informatsiiyno-analitichna dovidka pro viniknennya nadzvichaynih situatsIy v Ukrayini u 2018 rotsi. Retrieved from : https://www.dsns.gov.ua/ua/Dovidka-za-kvartal/87968.html. [Information and analytical report on the emergence of emergencies in Ukraine in 2018]. (data zvernennia : 05.09.2021) [in Ukrainian].
4. Informatsiyno–analItichna dovidka pro viniknennya nadzvichaynih situatsiy v Ukrayini u 2017 rotsi. Retrieved from : https://www.dsns.gov.ua/ua/Dovidka-za-kvartal/72899.html. [Information and analytical report on the emergence of emergencies in Ukraine in 2017]. (data zvernennia : 05.09.2021) [in Ukrainian].
5. Zvit pro osnovni rezultati dIyalnostI Derzhavnoyi sluzhbi Ukrayini z nadzvichaynih situatsIy u 2016 rotsi. Retrieved from : https://www.dsns.gov.ua/files/2017/2/22/2016.pdf [Report on the main results of the Civil Service of Ukraine for Emergencies in 2016]. (data zvernennia : 06.09.2021) [in Ukrainian].
6. Informatsiyno-analitichna dovidka pro nadzvichayni situatsiyi v UkrayinI, scho stalisya vprodovzh 2015 roku. Retrieved from : https://www.dsns.gov.ua/ua/Dovidka-za-kvartal/44615.html. [Information and analytical report on emergencies in Ukraine that occurred during 2015]. (data zvernennia : 06.09.2021) [in Ukrainian].
7. Informatsiyno–analitichna dovidka pro nadzvichayni situatsiyi v UkrayiniI, scho stalisya vprodovzh 2014 roku. Retrieved from : https://www.dsns.gov.ua/ua/Dovidka-za-kvartal/43867.html. [Information and analytical report on emergencies in Ukraine that occurred during 2014]. (data zvernennia : 06.09.2021) [in Ukrainian].
8. Informatsiyno–analitichna dovidka pro viniknennya NS v Ukrayini protyagom 2013 roku. Retrieved from : https://www.dsns.gov.ua/ua/Dovidka-za-kvartal/43123.html. [Information and analytical report on the occurrence of emergencies in Ukraine during 2013]. (data zvernennia : 06.09.2021) [in Ukrainian].
9. Informatsiyno–analitichna dovidka pro nadzvichayni situatsiyi, scho vinikli na teritoriyi Ukrayini protyagom 2012 roku. Retrieved from : https://www.dsns.gov.ua/ua/Dovidka-za-kvartal/42377.html.[ Information and analytical report on emergencies that occurred in Ukraine during 2012]. (data zvernennia : 06.09.2021) [in Ukrainian].
10. AnalIz viniknennya nadzvichaynih situatsIy v UkraYinI protyagom 2011 roku. Retrieved from : https://www.dsns.gov.ua/ua/Dovidka-za-kvartal/41629.html. [Analysis of emergencies in Ukraine during 2011]. (data zvernennia : 06.09.2021) [in Ukrainian].
11. Analiz viniknennya nadzvichaynih situatsIy v UkrayinI za 2010 rik. Retrieved from : ttps://www.dsns.gov.ua/ua/Dovidka-za-kvartal/41063.html. [Analysis of emergencies in Ukraine in 2010]. (data zvernennia : 08.09.2021) [in Ukrainian].
12. Pro natsionalnu bezpeku Ukrayini: Zakon Ukrayini vid 21.06.2018 # 2469-VIII. Retrieved from : ttps://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2469-19. [On National Security of Ukraine : Law of Ukraine dated from 21.06.2018 № 2469- VIII]. (data zvernennia : 06.09.2021) [in Ukrainian].
13. Pro rishennya Radi natsIonalnoyi bezpeki i oboroni Ukrayini vid 16.05.2019 «Pro organizatsiyu planuvannya v sektori bezpeki i oboroni Ukrayini» : Ukaz Prezidenta Ukrayini vid 16.05.2019 # 225/2019. Retrieved from : https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/225/2019 [On the decision of the National Security and Defense Council of Ukraine of 16.05.2019 «On the organization of planning in the security and defense sector of Ukraine» : Decree of the President of Ukraine of 16.05.2019 № 225/2019]. (data zvernennia : 06.09.2021) [in Ukrainian].
14. Kodeks tsivIlnogo zahistu Ukrayini : Zakon Ukrayini vid 02.10.2012 No5403-VI // Baza danih «Zakonodavstvo Ukrayini» / Verhovna Rada Ukrayini. Retrieved from : https://zakon.rada.gov.ua/laws/card/5403-17 [Code of Civil Protection of Ukraine : Law of Ukraine dated 02.10.2012 No. 5403-VI // Database «Legislation of Ukraine» / The Verkhovna Rada of Ukraine]. (data zvernennia : 28.08.2021) [in Ukrainian].
15. Pro zatverdzhennya Polozhennya pro Edinu derzhavnu sistemu tsivIlnogo zahistu : Postanova KabInetu MInIstrIv UkraYini vId 09.01.2014 # 11. Retrieved from : https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/11-2014-%D0%BF#Text. [On approval of the Regulation on the unified state system of civil protection: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine of 09.01.2014 № 11]. (data zvernennia : 01.10.2021) [in Ukrainian].
16. Pro zatverdzhennya Polozhennya pro Edinu derzhavnu sistemu tsivIinogo zahistu : Postanova Kabinetu Ministriv Ukrayini vid 09.01.2014 # 11. Retrieved from : https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/507-2019-%D0%BF#Text. [On approval of the Procedure for conducting a review of public safety and civil protection by the Ministry of Internal Affairs : Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine of May 22, 2019 № 507]. (data zvernennia : 29.10.2021) [in Ukrainian].
17. Pro rishennya Radi natsIonalnoyi bezpeki i oboroni Ukrayini vid 24 bereznya 2020 roku «Pro zvit schodo rezultativ provedennya oboronnogo oglyadu Ministerstvom oboroni Ukrayini» : Ukaz Prezidenta Ukrayini vid 24.03.2020 # 106/2020. Retrieved from : https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/106/2020. [On the decision of the National Security and Defense Council of Ukraine of March 24, 2020 «On the report on the results of the defense review by the Ministry of Defense of Ukraine» : Decree of the President of Ukraine of 24.03.2020 № 106/2020]. (data zvernennia : 13.09.2021) [in Ukrainian].
18. Van Iikelen, V. F. (2007). Otnoshenie mezhdu grazhdanskoy i voennoy vlastyami i formirovanie politiki bezopasnosti [The relationship between civil and military authorities and the formation of security policy]. Sbornik materialov Plana partnerskih deystviy po sozdaniyu institutov oboronyi i bezopasnosti (PAP-DIB) «Postroenie oboronyi i bezopasnosti». [Collection of materials of the Partnership Action Plan for the Establishment of Defense and Security Institutions (PAP-DIB) «Building Defense and Security»], 94–116 [in Russian].
19. Van Iikelen, V. F. (2007). Законодательный надзор над сектором безопасности [Legislative Oversight of the Security Sector]. Sbornik materialov Plana partnerskih deystviy po sozdaniyu institutov oboronyi i bezopasnosti (PAP-DIB) «Postroenie oboronyi i bezopasnosti». [Collection of materials of the Partnership Action Plan for the Establishment of Defense and Security Institutions (PAP-DIB) «Building Defense and Security»], 117–136 [in Russian].
20. Tagarev, T. (2011). Oboronnoe planirovanie – klyuchevyie protsessyi oboronnogo menedzhmenta [Defense planning – key processes of defense management]. Oboronnyiy menedzhment: oznakomlenie. Seriya «Menedzhment bezopasnosti i oboronyi», # 1 [Defense management : introduction. Series «Security and Defense Management», No 1., 41–68 [in Russian].

21. Trapans, Y. A. (2007). Ugrozy i bezopasnost' [Threats and security]. Sbornik Materialov Plana Partnerskih Deystviy Po Sozdaniyu Institutov Oboronyi I Bezopasnosti (PAP-DIB) «Postroenie Oboronyi I Bezopasnosti» [Collection of materials of the Partnership Action Plan for the Establishment of Defense and Security Institutions (PAP-DIB) «Building Defense and Security»], 137–153 [in Russian].
22. Frorat, G. (2011). Menedzhment finansov [Finance management]. Oboronnyy menedzhment: Oznakomleniye. Seriya «Menedzhment bezopasnosti i oborony» [Security and Defence Management : An Introduction], (1), 87–118[in Russian].
23. Trapans, Y. A. (2007). Demokratiya, bezopasnost' i oboronnoe planirovanie [Democracy, security and defense planning]. Sbornik Materialov Plana Partnerskikh Deystviy Po Sozdaniyu Institutov Oborony I Bezopasnosti (PAP-DIB) «Postroeniye Oborony I Bezopasnosti» [Collection of materials of the Partnership Action Plan for the Establishment of Defense and Security Institutions (PAP-DIB) «Building Defense and Security»], 154–171 [in Russian].
24. Bukur-Marku, K. (2007). Finansovoe planirovanie i raspredelenie resursov v sfere oborony [Defense financial planning and resource allocation]. Sbornik Materialov Plana Partnerskikh Deystviy Po Sozdaniyu Institutov Oborony I Bezopasnosti (PAP-DIB) «Postroeniye Oborony I Bezopasnosti» [Collection of materials of the Partnership Action Plan for the Establishment of Defense and Security Institutions (PAP-DIB) «Building Defense and Security»], 209–224 [in Russian].
25. Treddenik, D. (2011). Menedzhment lyudskikh resursov [Human resource management]. Oboronnyiy menedzhment : Oznakomlenie. Seriya «Menedzhment bezopasnosti i oboronyi» [Security and Defence Management : An Introduction], (1), 119– 152 [in Russian].
26. Molnar, F. (2007). Printsipy i praktika kadrovoi politiki na primere Sil oborony Vengrii [Principles and practice of personnel policy on the example of the Hungarian Defense Forces ]. Sbornik Materialov Plana Partnerskih Deystviy Po Sozdaniyu Institutov Oboronyi I Bezopasnosti (PAP-DIB) «Postroenie Oboronyi I Bezopasnosti» [Collection of materials of the Partnership Action Plan for the Establishment of Defense and Security Institutions (PAP-DIB) «Building Defense and Security»], 193–208 [in Ukrainian].
27. Lourens, E. (2011). Menedzhment v sfere zakupochnoi deyatel'nosti [Management n the field of purchase activity]. Oboronnyi menedzhment : Oznakomlenie. Seriya «Menedzhment bezopasnosti i oborony» [Defens management : acquaintance. Series are «Management of safety and defensive»], (1), 153–190 [in Russion].
28. Sahaniuk, F. V., Frolov, V. S., Ustymenko, O. V., & Lobko, M. M. (2017). Sektor bezpeky i oborony Ukrainy : Teoriia, stratehiia, praktyka [Security and defense sector of Ukraine: theory, strategy, practice]. Akadempres. 180 s. [in Ukrainian].
29. Frolov, V. S., & Sahaniuk, F. V. (2018). Systemnyi pidkhid do realizatsii oboronnoi reformy v Ukraini [A systematic approach to the implementation of defense reform in Ukraine]. Zbirnyk naukovykh prats Tsentru voienno-stratehichnykh doslidzhen Natsionalnoho universytetu oborony Ukrainy imeni Ivana Cherniakhovskoho, (1 (62)), 13–18. DOI : https://doi.org/10.33099/2304-2745/2018-1-62/13-18. [in Ukrainian].
30. Ivashchenko, A. M., Pavlikovskyi, A. K., & Sivokha, I. M. (2017). Kontseptsiia oboronnoho planuvannia na osnovi rozvytku spromozhnostei: Problemy vprovadzhennia [The concept of defense-based defense planning: implementation issues]. Zbirnyk naukovykh prats tsentru voienno-stratehichnykh doslidzhen Natsionalnoho universytetu oborony Ukrainy imeni Ivana Cherniakhovskoho, (1 (59)), 53–58. DOI : https://doi.org/10.33099/2304-2745/2017-1-59/53-58. [in Ukrainian].
31. Surkov, O. O. (2018). Metodychnyi pidkhid do formalizatsii stratehichnoho planuvannia rozvytku spromozhnostei Zbroinykh Syl ta inshykh skladovykh syl oborony [Methodical approach to the formalization of strategic planning for the development of capabilities of the Armed Forces and other components of the Defense Forces]. Zbirnyk naukovykh prats tsentru voienno-stratehichnykh doslidzhen Natsionalnoho universytetu oborony Ukrainy imeni Ivana Cherniakhovskoho, (1), 34–40. Retrieved from : http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpcvsd_2018_1_7 [in Ukrainian].
32. Morokhov, O. O. (2019). Dosvid NATO shchodo oboronnoho planuvannia na osnovi spromozhnostei : Mozhlyvosti yoho zastosuvannia u sferi zabezpechennia bezpeky derzhavnoho kordonu Ukrainy [NATO's capability-based defense planning experience: opportunities for its application in the field of Ukraine's state border security]. Derzhavne upravlinnia u sferi derzhavnoi bezpeky ta okhorony hromadskoho poriadku, (13), 127–130. DOI : https://doi.org/10.32843/2663-5240-2019-13-24 [in Ukrainian].
33. Malyshev, O. V., Malysheva, N. R., Kalmykov, V. H., & Levchuk, O. V. (2020). Oboronne planuvannia na osnovi spromozhnostei v Ukraini: Potochnyi stan i perspektyvy [Capability-based defense planning in Ukraine: current status and prospects]. Zbirnyk naukovykh prats Tsentru voienno-stratehichnykh doslidzhen Natsionalnoho universytetu oborony Ukrainy imeni Ivana Cherniakhovskoho, (3 (70)), 54–61. DOI : https://doi.org/10.33099/2304-2745/2020-3-70/54-61 [in Ukrainian].
34. Pavlikovskyi, A., Frolov, V., Sahaniuk, F., & ta in. (2020). Oboronna reforma: Systemnyi pidkhid do oboronnoho menedzhmentu [Defense reform : a systematic approach to defense management]. NUOU. 274 s. [in Ukrainian].
35. Kalynenko, L., Sliusar, A., Fomin, A., & Borysova, A. (2020). Spromozhnosti u sferi tsyvilnoho zakhystu [Capabilities in the sphere of civil protection]. Naukovyi visnyk : Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka, (1 (9)), 4–13. DOI : https://doi.org/10.33269/nvcz.2020.1.4-13 [in Ukrainian].
36. Korobkin, V., & Sliusar, A. (2020). Spromozhnosti u sferi tsyvilnoho zakhystu : Poshuk katehorialno-poniattievoho aparatu [Capabilities in the sphere of civil protection: search for a categorical-conceptual apparatus]. Naukovyi visnyk : Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka, (2 (10)), 61–68. DOI : https://doi.org/10.33269/nvcz.2020.2.61-68 [in Ukrainian].
37. Pro zatverdzhennia poriadku provedennia oboronnoho ohliadu v Ministerstvi oborony [On approval of the procedure for conducting a defense inspection at the Ministry of Defense], Postanova Kabinetu Ministriv № 941 (2018) (Ukraine). Retrieved from : https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/941-2018-%D0%BF [in Ukrainian].
38. Pro rishennia Rady natsionalnoi bezpeky i oborony Ukrainy vid 14.09.2020 «Pro Stratehiiu natsionalnoi bezpeky Ukrainy» [On the decision of the National Security and Defense Council of Ukraine dated 14.09.2020 «On the National Security Strategy of Ukraine»], Ukaz Prezydenta № 392/2020 (2020) (Ukraine). Retrieved from : https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/392/2020 (data zvernennia : 10.09.2021) [in Ukrainian].
39. Proekt Strategiyi gromadskoyi bezpeki ta tsivIlnogo zahistu Ukrayini. [Draft Strategy of Public Safety and Civil Protection of Ukraine]. Retrieved from : https://mvs.gov.ua/ministry/normativna-baza-mvs/proekti-normativnix-aktiv/strategiya-gromadskoyi-bezpeki-ta-civilnogo-zaxistu-ukrayini-zatverdzeno-vid-29062021.
40. Bychenkov, V.V., Mykhailova, A.V. Do pitannya rozroblennya algoritmu viznachennya neobhidnogo skladu organizatsiynih struktur Derzhavnoyi sluzhbi Ukrayini z nadzvichaynih situatsiy na dovgostrokovu perspektivu. [On the issue of developing an algorithm for determining the required composition of organizational structures of the State Emergency Service of Ukraine in the long-term perspective] Spromozhnosti funktsionalnih ta teritorialnih pidsistem EDSTSZ dlya operativnogo rozv'yazannya zavdan za priznachennyam : materiali 22 Vseukrayinskoyi naukovo-praktichnoyi konferentsiyi (za mizhnarodnoyu uchastyu) (27.10.2021, m. Kiyiv). Kiyiv : IDU ND TSZ, 2021. S. 20–27 [in Ukrainian].

# THE METHOD FOR THE DETERMINATION OF THE NECESSARY COMPOSITION OF TYPICAL ORGANIZATIONAL STRUCTURES OF THE UNITED NATIONAL CIVIL PROTECTION SYSTEM FOR THE LONG-TERM PERSPECTIVE

*A. Mykhailova*

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

KEYWORDS:

security and defence sector; review of the security sector; planning; United National Civil Protection System; emergency; typical organizational structure; long-term perspective; method

ANNOTATION

The paper analyses statistical information on emergencies in Ukraine which occurred for the last ten years. The conclusions derived confirmed actuality and necessity of conduction of proper measures to estimate existing and determine necessary forces and means of civil protection as well as evaluation of the planned and necessary level of the state financing. At present, one of the effective options for changing the situation in terms of the number of emergencies occurring and the scale of their consequences (both human casualties and material losses) is the transition to a capacity-based planning procedure. Research and implementation of such an approach will also contribute to the integration of our state to the European Union. The purpose of this paper is to develop a method for determining the required composition of standard organizational structures of the United National Civil Protection System in the long-term perspective for proper performance of the tasks under certain scenarios of probable emergencies while minimizing financial resources. To achieve this goal as well as to study the experience of the North Atlantic Alliance, the European Union and the achievements of our state in the development of security and defence, an analytical review of the legal framework and research results of foreign and domestic scientists was conducted. Based on the results of the research, a method for determining the required composition of standard organizational structures of the United National Civil Protection System for the long-term perspective for proper performance of tasks under specified scenarios of probable emergencies under conditions of establishing the minimum necessary resources of the security sector was proposed, and it is in this scientific novelty of the work performed lies.

*УДК 623.459.6*

# ПИТАННЯ ВИРОБНИЦТВА СУЧАСНИХ ЗАСОБІВ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАХИСТУ НАСЕЛЕННЯ ТА ФОРМУВАНЬ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ

*https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.1.47-54*

Юрченко В. О*., ORCID iD 0000-0003-2238-1206
Соколовський О. О.,ORCID iD 0000-0002-7861-3144

*E-mail: valaleks@ukr.net

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

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

*Надійшла до редакції: 12.04.2022*
*Пройшла рецензування: 27.04.2022*

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

засоби індивідуального захисту; хімічно небезпечні речовини; спеціальні властивості; удосконалення засобів; комплексний захист населення

АНОТАЦІЯ

З метою забезпечення населення та формувань цивільного захисту сучасними засобами індивідуального захисту розглянуто світові технології отримання захисних матеріалів зі спеціальними властивостями, які використовуються для виробництва засобів захисту від небезпечних хімічних речовин і біологічних агентів. Як у мирний час, так і в особливий період залишається загроза руйнування потенційно небезпечних об'єктів ядерної енергетики та хімічної промисловості. Сьогодні змінюються вимоги до захисних властивостей та часу захисної дії засобів індивідуального захисту, які на певному етапі мають забезпечувати ефективний комплексний захист від негативних для здоров'я та життя людини процесів і явищ у разі виникнення надзвичайних ситуацій. На основі методу теоретичних досліджень характеристик та базових технологій у сфері розроблення й виробництва основних зразків засобів індивідуального захисту шкіри фільтрувального типу та органів дихання провідних країн світу розглянуто проблемні питання подальшого їх удосконалення для населення і формувань цивільного захисту та визначено підходи до їх розв'язання. Встановлено, що функціональні властивості сучасних засобів захисту в основному залежать від вибору тканини та її здатності чинити опір зовнішній дії. З'ясовано, що підвищення універсальності засобів індивідуального захисту шкіри фільтрувального типу може бути досягнуто через створення багатошарових матеріалів зі спеціальними властивостями, використання оксидів алюмінію, цинку, магнію, титану в разі створення матеріалів із самодегазувальними властивостями, а ефективність засобів індивідуального захисту органів дихання підвищується внаслідок збільшення часу захисної дії фільтрів та ізолювальних властивостей напівмасок. Визначено напрями подальших досліджень, які пов'язані з пошуком та впровадженням нанотехнологій для створення і виготовлення сучасних засобів індивідуального захисту.

**Постановка проблеми.** Нині змінюються вимоги до захисних властивостей та часу захисної дії засобів індивідуального захисту (далі – ЗІЗ), які мають забезпечувати ефективний комплексний захист від небезпечних хімічних речовин (далі – НХР) та біологічних агентів (далі – БА), а також і від негативних для здоров'я та життя людини процесів та явищ під час виникнення надзвичайних ситуацій (далі – НС).

Одним з основних завдань цивільного захисту (далі – ЦЗ) є захист населення України від небезпек, що виникають під час НС природного, техногенного характеру та у разі військових конфліктів.

Найважливішою складовою захисту населення є організація забезпечення його

ЗІЗ [1]. Необхідність вдосконалення роботи із забезпечення населення, яке не працює, і персоналу суб'єктів господарювання та формувань ЦЗ ЗІЗ зумовлена безліччю факторів і насамперед зростаючим ризиком техногенних аварій та катастроф.

Сьогодні на території України функціонує близько 24 тис. потенційно небезпечних об'єктів (далі – ПНО) [2–3]. Крім цього, налічується понад 12 тис. об'єктів підвищеної небезпеки (далі – ОПН) [2; 4], виробництво яких пов'язано з радіоактивними речовинами (далі – РР) та НХР, що зумовлює значну техногенну загрозу. З огляду на ці обставини набуває реальності необхідність у гарантованому забезпеченні населення сучасними ЗІЗ у разі виникнення НС на зазначених об'єктах.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблеми, пов'язані з визначенням надійних за своїми технічними характеристиками ЗІЗ, досліджуються в таких роботах.

О. Левченко, В. Савицький, В. Козачок, В. Сагло висвітлювали стан хімічної безпеки як невід'ємний складовий елемент національної безпеки країни та джерело сучасних хімічних загроз для населення в Україні та світі [5].

С. Чеберячко, Ю. Чеберячко, І. Шайхлісламова аналізували ефективність фільтрувальних респіраторів за двома компонентами, а саме: часом захисної дії фільтрів та ізолювальних властивостей напівмасок [6].

Ю. Чеберячко розглядав теорію конструювання та вдосконалення процесів індивідуального підбору й використання протипилових респіраторів та досліджував будови конструкцій напівмасок, які дають змогу забезпечити високі ізолювальні властивості [7].

Л. Устінова, Р. Швець, Н. Курділь, В. Баркевич, В. Сагло, О. Євтодьєв здійснили порівняльний аналіз технічних характеристик сучасних моделей ЗІЗ, що є в арсеналі Збройних Сил України та зарубіжних країн [8].

Я. Король, Ю. Лісніченко проаналізували характеристики та базові технології у сфері розроблення й виробництва основних зразків ЗІЗ шкіри фільтрувального типу, що перебувають на озброєнні Збройних Сил України та армій провідних країн світу, і проводять дослідження щодо отримання спеціальних тканин для виготовлення ЗІЗ [9].

Banaee S., & Que Hee, S. S. досліджують сполуки з високою температурою кипіння та моделюють середовище одягнених рукавичок [10].

Л. Тарасов, А. Сухова, Є. Штукіна дослідили характеристики сучасних ЗІЗ шкіри під час несприятливих впливів різних небезпек [10].

Проте питання виробництва надійних ЗІЗ для захисту населення та оснащення формувань ЦЗ на сучасному етапі залишається недослідженим.

**Формулювання цілей досліджень.** Аналіз базових технологій розроблення й виробництва, типів, маркування та призначення ЗІЗ кращих європейських стандартів і визначення напрямів подальшого удосконалення вітчизняних ЗІЗ для захисту населення та оснащення формувань ЦЗ.

**Методи дослідження.** Під час наукової розвідки було використано метод аналітичних досліджень та метод експертної оцінки, що дало можливість досягти визначеної у статті мети.

**Виклад основного матеріалу.** У багатьох зарубіжних країнах виготовляються найрізноманітніші ЗІЗ. Їх використання регламентується відповідними законами, правилами, стандартами та сертифікатами. Об'єднуючим країни органом стала Міжнародна організація праці (далі – МОП), яка слугує орієнтиром для країн у національній політиці, законодавстві та практиці.

Одне з найважливіших завдань і особлива функція МОП – це ухвалення конвенцій і рекомендацій, які встановлюють міжнародні норми. До таких конвенцій належить [12], згідно з якою роботодавці зобов'язані забезпечувати працівників ЗІЗ і утримувати їх в

належному стані, а працівники – в обов'язковому порядку їх застосовувати. У країнах Євросоюзу (далі – ЄС) прийнятий також Регламент [13]. Він поширюється на всі види ЗІЗ, за винятком тих, які використовуються збройними силами, і тих, які регулюються іншими правилами. Також відповідно до нього встановлюються основні вимоги безпеки, яким повинні відповідати ЗІЗ на момент їх виготовлення і виходу на ринок ЄС, а також вимоги до сертифікації та маркування продукції, що наведено в табл. 1

.

*Таблиця 1* – Типи, маркування та призначення протигазових і комбінованих фільтрів, які виготовляються у країнах ЄС

| Тип | Кодовий колір | Шкідливі речовини, від яких забезпечується захист |
|---|---|---|
| P | Білий | Аерозолі (пил, дим, туман), бактерії й віруси |
| A | Коричневий | Органічні пари й гази з температурою кипіння >65° С |
| B | Сірий | Неорганічні гази (хлор, фтор, бром, сірководень, сірковуглець, хлорціан, галогени), крім CO |
| E | Жовтий | Кислі гази й пари азотної кислоти |
| K | Зелений | Аміак і аміни |
| NO-P3 | Синьо-білий | Оксиди азоту й аерозолі (пил, дим, туман) |
| Hg-P3 | Червоно-білий | Ртуть і аерозолі (пил, дим, туман) |
| AX | Коричневий | Органічні пари з температурою кипіння <65° С |
| SX | Фіолетовий | Від спеціальних речовин |
| ABEK-P | Багатобарвний: коричневий, сірий, жовтий, зелений, білий | Пари розчинників, хлор, двоокис сірки, аміак і аерозолі (пил, дим, туман) |
| A-P | Двоколірний: коричневий, білий | Пари й гази, як А, й аерозолі (пил, дим, туман) |
| B-P | Двоколірний: сірий, білий | Гази, як В, і аерозолі (пил, дим, туман), захищає також від тих самих газів, що А та Е |
| E-P | Двоколірний: жовтий, білий | Гази, як Е, і аерозолі (пил, дим, туман) |
| K-P | Двоколірний: зелений, білий | Аміак, аміни й аерозолі (пил, дим, туман) |
| AX-P | Двоколірний: коричневий, білий | Пари органічних розчинників з температурою кипіння нижче 65° С і аерозолі (пил, дим, туман) |
| Reaktor Hg-P3 | иколірний: жовтогарячий, червоний, білий | Йод радіоактивний, метилйодид радіоактивний і радіоактивні частки, а також органічні сполуки ртуті, пари ртуті й аерозолі (пил, дим, туман) |

*Джерело:* [13; 15]

Якість ЗІЗ у США встановлює спеціальний орган – Американський національний інститут стандартів (далі – ANSI) [8–9]. Нормування забезпечення ЗІЗ і їх експлуатація вирішуються за допомогою стандартів, які розробляє Управління з охорони праці в Міністерстві праці США. У стандарти включають гранично допустиму максимальну разову концентрацію хімічної речовини (далі – ГДК), доступ найманих працівників до інформації про небезпеку, їхні вимоги до заходів щодо використання засобів ЗІЗ.

Аналіз використання зарубіжними країнами ЗІЗ показує, що перевага надається групі індивідуальних фільтрувальних засобів захисту органів дихання: респіраторам, саморятівникам та протигазам різного призначення. Нині випускаються класи респіраторів, які наведено в табл. 2:

респіратори протиаерозольні;
напівмаски фільтрувальні;
респіратори патронного типу;
протипилові респіратори;

саморятівники, які призначені для індивідуального захисту органів дихання, очей та голови людини від впливу НХР, БА, РР, радіоактивного пилу та інших аерозолів у вигляді пилу.

.

*Таблиця 2–* Перелік європейських стандартів на фільтрувальні ЗІЗОД

| ЗІЗОД за принципом подачі повітря | Конструктивні частини | Назва фільтрів ЗІЗОД | Позначення стандарту |
|---|---|---|---|
| Самовсмоктувальні | Фільтри, які використовуються з маскою (EN 136), напівмаскою, чвертьмаскою (EN 140) чи з мундштучним пристроєм (EN 142) | Фільтри протигазові та комбіновані | EN 14387 |
| | | Фільтри протиаерозольні | EN 143 |
| | | Фільтри з дихальними шлангами (позамаскові) – протиаерозольні, протигазові та комбіновані фільтри | EN 12083 |
| | Фільтрувальна лицьова частина | Фільтрувальні протиаерозольні напівмаски | EN 149 |
| | | Фільтрувальні напівмаски з клапанами для захисту від газів чи від газів та пилу | EN 405 |
| | | Напівмаски без клапанів вдиху та з віддільними фільтрами для захисту від газів, або газів і аерозолів, або тільки від аерозолів | EN 1827 |
| З примусовим подаванням повітря | | Моторові фільтрувальні пристрої з шоломом або капюшоном | EN 12941 |
| | | Моторові повітронагнітальні фільтрувальні пристрої з масками, напівмасками або чвертьмасками | EN 12942 |

*Джерело:* [13]

Разом із тим одним із перспективних напрямів удосконалення ЗІЗ слід вважати створення композиційних фільтрувально-сорбувальних матеріалів і на їх основі – компоновок для корпусів респіраторів, а також саморятівників [6–7].

Водночас у деяких країнах розглядаються технології отримання захисних матеріалів зі спеціальними властивостями, які використовуються під час створення сучасних ЗІЗ шкіри фільтрувального типу. Встановлено, що функціональні властивості сучасного захисного одягу багато в чому залежать від вибору тканини та її здатності чинити опір зовнішній дії й відводити випари з поверхні тіла [11]. Визначено, що підвищення універсальності ЗІЗ шкіри фільтрувального типу може бути досягнуто внаслідок створення багатошарових матеріалів зі спеціальними властивостями, впровадження нанотехнологій та використання оксидів алюмінію, цинку, магнію, титану або комплексних солей тих же металів [10].

Своєю чергою у США розроблені спеціальні вимоги до ЗІЗ, проводяться дослідження з використання нових технологій з метою отримання спеціальних тканин для виготовлення засобів захисту шкіри, здатних надійно блокувати проникнення високотоксичних речовин з одночасною їх дегазацією [7–8; 10]. Використання захисного комплекту, виготовленого за технологією селективно проникних мембран (далі – СПМ), найефективніше під час виконання завдань у складних погодних умовах (низькі температури, опади) у разі їх одночасного використання зі спеціальною термобілизною з тканини «Полартек»

(Великобританія) або «Термостат» (США) [9; 11].

У той же час спеціалісти ФРН вважають перспективними технології з використанням активованого вугілля (з розміром часток < 1 мм) та сферичних сорбентів, які наносяться в концентрації 140–220 г/м2. Такий матеріал, розробником якого стала німецька фірма «BLÜCHER», узагальнено називають SARATOGA [9–10]. Саме її модифікований варіант, удосконалений введенням додаткового протиаерозольного шару на основі нетканого матеріалу, застосовано в процесі розроблення основного варіанта екіпіровки «солдата майбутнього» армії ФРН – Gladius.

Ефективним способом підвищення сорбційної здатності захисних комплектів фільтрувального типу є введення до їх складу рідкого адсорбенту, який поєднується з хемосорбентом, не розкладаючи його, і водночас добре поглинає пари НХР. Такими рідкими адсорбентами можуть бути хлорпарафін або гліцерин. Сорбент, що утворюється таким чином, надійно закріплюється на тканині, що забезпечує стійкість у процесі експлуатації виробів.

Останніми роками були внесені значні зміни в законодавчу базу України з питань ЦЗ. Так, в основний документ [1], в якому регламентується порядок забезпечення населення ЗІЗ, були внесені зміни, що суттєво покращили захист населення від дії іонізуючого випромінювання та хімічного і біологічного забруднення. Враховуючи досвід зарубіжних держав та вимоги нормативних документів [15–16], в Україні налаштовується виробництво сучасних ЗІЗ, які наведено в табл. 3, що має надійно убезпечити населення в разі виникнення НС від впливу НХР, БА, РР і РП та формування ЦЗ під час проведення аварійно-рятувальних та інших невідкладних робіт.

*Таблиця 3* – Вимоги до фільтрувальних ЗІЗОД, що регламентовані міждержавними стандартами ГОСТ ССБТ, а також національними стандартами, що гармонізовані з європейськими

| Найменування показника | ГОСТ ССБТ | | | ДСТУ EN | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ступінь захисту | | | клас ефективності | | |
| | | | | | | |
| 1. Коефіцієнт захисту | >100 | J100 | J10 | J50 | J12 | |
| 2. Коефіцієнт проникнення тест-аерозолю крізь протиаерозольний фільтр, %, не більше | | | | | | |
| з витратою: | | | | | | |
| - 30 дм$^3$/хв (за масляним туманом) | J0,1 | J1,0 | >1,0 | - | | |
| - 95 дм$^3$/хв (за масляним туманом та хлоридом натрію) | - | - | - | J0,05 | J6 | J20 |
| 3. Початковий опір протиаерозольного фільтра повітряному потоку з витратою, Па, не більше: | | | | | | |
| *- 30 дм$^3$/хв* | *J60* | J60 | J60 | J120 | J70 | J60 |
| *- 95 дм$^3$/хв* | - | - | - | J420 | J240 | J210 |
| 4. Початковий опір протигазового фільтра повітряному потоку з витратою, Па, не більше: | | | | | | |
| - 30 дм$^3$/хв | J200 | J130 | J100 | J160 | J140 | J100 |
| - 95 дм$^3$/хв | - | - | - | J640 | J560 | J400 |
| 5. Об'ємна частка $CO_2$, %, не більше | J2 | | | J1 | | |

*Джерело:* [13]

**Висновки та напрями подальших досліджень**. Таким чином, за результатами проведеного аналізу характеристик та базових технологій у сфері розроблення і виробництва сучасних ЗІЗ визначено основні напрями щодо поліпшення їх захисних властивостей та забезпечення універсальності. Підвищення універсальності може бути досягнуто через створення багатошарових матеріалів зі спеціальними властивостями, спроможних надійно блокувати проникнення високотоксичних НХР з одночасною їх дегазацією.

Для підвищення сорбційної здатності захисних комплектів фільтрувального типу доцільним є введення до його складу рідкого адсорбенту.

Напрями подальшого дослідження перебувають у площині проведення додаткових експериментів та розв'язання низки проблем, пов'язаних із жорстким зв'язуванням наночасток з різними видами текстильних субстратів (бавовна, поліамід, поліестер), що дасть змогу отримати дуже міцний, комфортний, здатний до самоочищення «розумний» матеріал. Реалізація розглянутих напрямів удосконалення ЗІЗ є актуальним науково-технічним завданням, вирішення якого забезпечить суттєве підвищення захищеності формувань ЦЗ та населення під час НС техногенного характеру.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ


1. Про затвердження Порядку забезпечення населення і працівників формувань та спеціалізованих служб цивільного захисту засобами індивідуального захисту, приладами радіаційної та хімічної розвідки, дозиметричного і хімічного контролю : постанова Кабінету Міністрів України від 19.08.2002 р. № 1200. *Офіційний вісник України.* 2002. № 34. С. 163. URL : https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1200-2002-%D0%BF#Text (дата звернення : 07.02.2022).
2. Інформаційно-аналітична довідка про виникнення НС в Україні у 2020 році. URL : https://www.dsns.gov.ua/ua/Dovidka-za-kvartal/119288.html (дата звернення : 07.02.2022).
3. Про затвердження переліку об'єктів, що належать суб'єктам господарювання, проектування яких здійснюється з урахуванням вимог інженерно-технічних заходів цивільного захисту : постанова Кабінету Міністрів України від 09.11.2014 р. № 6. *Офіційний вісник України.* 2014. № 7. С. 26. URL : https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/6-2014-%D0%BF#Text (дата звернення : 07.02.2022).
4. Про затвердження Порядку і правил проведення обов'язкового страхування цивільної відповідальності суб'єктів господарювання за шкоду, яка може бути заподіяна пожежами та аваріями на об'єктах підвищеної небезпеки, включаючи пожежовибухонебезпечні об'єкти та об'єкти, господарська діяльність на яких може призвести до аварій екологічного і санітарно-епідеміологічного характеру : постанова Кабінету Міністрів України від 16.11.2002 р. № 1788. *Офіційний вісник України.* 2002. № 47. С. 253. URL : https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1788-2002-%D0%BF#Text (дата звернення : 07.02.2022).
5. Військова токсикологія, радіологія, медичний захист : підруч. / О. Є. Левченко, В. Л. Савицький, В. Ю. Козачок, В. І. Сагло ; за ред. проф. О.Є. Левченко. Київ : УВМА, 2017. 785 с.
6. Чеберячко С. І., Чеберячко Ю. І., Шайхлісламова І. А. Проєктування півмасок фільтрувальних респіраторів. *Наука та інновації*. 2020. Т. 16. № 5. С. 97–109.
7. Чеберячко Ю. І. Розвиток теорії конструювання та вдосконалення процесів індивідуального підбору і використання протипилових респіраторів : дис. … д-ра т. наук : 05.26.01/ Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». Дніпро, 2019. 396 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., Лісніченко 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 (дата звернення : 07.02.2022).

## REFERENCES

1. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy Pro zatverdzhennia Poriadku zabezpechennia naselennia i pratsivnykiv formuvan ta spetsializovanykh sluzhb tsyvilnoho zakhystu zasobamy indyvidualnoho zakhystu, pryladamy radiatsiinoi ta khimichnoi rozvidky, dozymetrychnoho i khimichnoho kontroliu vid 19 serpnia 2002 roku № 1200 [On approval of the Procedure for providing the population and employees of formations and specialized civil protection services with personal protective equipment, radiation and chemical reconnaissance devices, dosimetric and chemical control: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine of August 19, 2002 № 1200] (2002, № 1200). *Official newsletter of Ukraine*, p. 34. Retrieved from : https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1200-2002-%D0%BF#Text [in Ukrainian].
2. Informatsiino – analitychna dovidka pro vynyknennia NS v Ukraini u 2020 rotsi [Information and analytical report on the occurrence of emergencies in Ukraine in 2020.]. Retrieved from https://www.dsns.gov.ua/ua/Dovidka-za-kvartal/119288.html [in Ukrainian].
3. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy Pro zatverdzhennia pereliku obiektiv, shcho nalezhat subiektam hospodariuvannia, proektuvannia yakykh zdiisniuietsia z urakhuvanniam vymoh inzhenerno-tekhnichnykh zakhodiv tsyvilnoho zakhystu vid 09 sichnia 2014 roku № 6 [On approval of the list of facilities belonging to economic entities, the design of which is carried out taking into account the requirements of engineering and civil protection measures : Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine of November 9, 2014 № 6] (2014, № 6) *Official newsletter of Ukraine.* 2014. № 7. p. 26. Retrieved from : https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/6-2014-%D0%BF#Text [in Ukrainian].
4. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy Pro zatverdzhennia Poriadku i pravyl provedennia oboviazkovoho strakhuvannia tsyvilnoi vidpovidalnosti subiektiv hospodariuvannia za shkodu, yaka mozhe buty zapodiiana pozhezhamy ta avariiamy na obiektakh pidvyshchenoi nebezpeky, vkliuchaiuchy pozhezhovybukhonebezpechni obiekty ta obiekty, hospodarska diialnist na yakykh mozhe pryzvesty do avarii ekolohichnoho i sanitarno-epidemiolohichnoho kharakteru vid 16 lystopada 2002 roku №1788[About the statement of the Order and rules of carrying out of obligatory insurance of civil liability of subjects of managing for the damage which can be caused by fires and accidents on objects of increased danger, including fire and explosive objects and objects on which economic activity can lead to accidents of ecological and sanitary-epidemiological nature : Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine of November 16, 2002 №1788 ] (2002, № 1788) *Official newsletter of Ukraine*, 2002. p. № 47. Retrieved from : https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1788-2002-%D0%BF#Text [in Ukrainian].
5. Levchenko, O. Ie., Savytskyi, V. L., Kozachok, V. Iu., Sahlo, V. I. (2017) Viiskova toksykolohiia, radiolohiia, medychnyi zakhyst : Pidruchnyk. / za red. prof. O.Ie. Levchenko.*[ Military toxicology, radiology, medical protection*]. Kyiv : UVMA. 785 s. [in Ukrainian].
6. Cheberiachko S.I., Cheberiachko Yu.I., Shaikhlislamova I.A. (2020) Proiektuvannia pivmasok filtruvalnykh respiratoriv.*[ Design of half masks of filter respirators]*. Naukovo-praktychnyi zhurnal «Nauka ta innovatsii» NAN Ukrainy. T. 16. No 5 [in Ukrainian].
7. Cheberiachko Yu. I. (2019) Rozvytok teorii konstruiuvannia ta vdoskonalennia protsesiv indyvidualnoho pidboru i vykorystannia protypylovykh respiratoriv: dys. … d-ra t. nauk: 05.26.01/ Nats. tekhn. un-t «Dniprovska politekhnika».*[Rozvytok teorii konstruiuvannia ta vdoskonalennia protsesiv indyvidualnoho pidboru i vykorystannia protypylovykh respiratoriv]* Nats. tekhn. un-t «Dniprovska politekhnika». Dnipro. 396 s. [in Ukrainian].
8. Ustinova, L. A., Shvets, R .M., Kurdil, N. V., Barkevych, V. A., Sahlo, V. I., Yevtodiev, O. A. (2019) Porivnialnyi analiz tekhnichnykh kharakterystyk suchasnykh modelei zasobiv indyvidualnoho zakhystu orhaniv dykhannia. *[ Comparative analysis of technical characteristics of modern models of personal respiratory protection]* Ukrainskyi zhurnal suchasnykh problem toksykolohii. № 3 [in Ukrainian].
9. Koro,l Ya., Lisnichenko, Yu. (2020). Osnovni napriamy udoskonalennia zasobiv indyvidualnoho zakhystu shkiry filtruiuchoho typu. *[The main directions of improvement of personal protective equipment of the filter type].* Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoi akademii Derzhavnoi prykordonnoi sluzhby Ukrainy. Seriia : viiskovi ta tekhnichni nauky. № 81(3) [in Ukrainian].
10. Banaee, S., & Que Hee, S. S. (2020). Pronyknennya khimichnykh rechovyn v rukavychkakh: stan suchasnykh tekhnolohiy – hastyna 2. *[Glove permeation of chemical s: The state of the art of current practice—Part 2].* Journal of Occupational and Environmental Hygiene. № 17(4). Doi :10.1080/15459624.2020.1721509 [in Ukrainian].
11. Tarasov, L. A., Sukhova, A. A., Shtukina, YE. A. (2020). Tekhnichni kharakterystyky suchasnykh zasobiv indyvidual′noho zakhystu shkiry vid nespryyatlyvykh vplyviv riznykh nebezpek *[Technical characteristics of modern skin personal protective equipment against adverse impacts of various hazards].* Medico-Biological and Socio-Psychological Issues of Safety in Emergency Situations. № 3. Doi :10.25016/2541-7487-2020-0-3-76-86 [in Ukrainian].
12. Konventsiia pro bezpeku v zastosuvanni khimichnykh rechovyn na vyrobnytstvi N 170 (ukr/ros).*[Convention on Safety in the Use of Chemicals in Production*] (1990, № 170) Mizhnarodna orhanizatsiia pratsi. Konventsiia, Mizhnarodnyi dokument.
13. Rehlament Yevropeiskoho parlamentu ta Rady Yevropeiskoho Soiuzu 2016/425 vid 09.03.2016 «Pro zasoby indyvidualnoho zakhystu i pro skasuvannia Dyrektyvy 89/686 YeES». [On personal protective equipment and repealing Directive 89/686 EEC] (2016, № L 81/51) *Ofitsiinyi visnyk Yevropeiskoho Soiuzu.*
14. Khalil, E. A technical overview on protective clothing against chemical hazard // *AASCIT J.Chem. 2015. V. 2. P. 67.*
15. Nakaz Derzhavnoho komitetu Ukrainy z promyslovoi bezpeky, okhorony pratsi ta hirnychoho nahliadu Pro zatverdzhennia Pravyl vyboru ta zastosuvannia zasobiv indyvidualnoho zakhystu orhaniv dykhannia vid 28 hrudnia 2007 roku № 331.[On approval of the Rules for selection and application of personal respiratory protection: Order of the State Committee of Ukraine for Industrial Safety, Labor Protection and Mining Supervision of December 28, 2007 № 331]. (2007, № 331). *Ofitsiinyi visnyk Ukrainy,* p. 28. Retrieved from : https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0285-08 [in Ukrainian].
16. SOU MNS 75.2-00013528-002:2010. Bezpeka u nadzvychainykh sytuatsiiakh. Filtruvalni zasoby indyvidualnoho zakhystu orhaniv dykhannia naselennia u nadzvychainykh sytuatsiiakh. Klasyfikatsiia y zahalni tekhnichni vymohy : nakaz MNS Ukrainy vid 25 liutyi 2010 roku № 104. [Emergency safety. Filtering means of individual protection of respiratory organs of the population in emergency situations. Classification and general technical requirements] (2010, № 104). *Ofitsiine vydannia. Kyiv. MNS Ukrainy.* Retrieved from : http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=55006(http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=55006 [in Ukrainian].

# ISSUES OF PRODUCTION OF MODERN MEANS OF INDIVIDUAL PROTECTION OF THE POPULATION AND FORMATIONS OF CIVIL PROTECTION

*V. Yurchenko, O. Sokolovsky*
*Institute of Public Administration and Research in Civil Protection, Ukraine*

KEYWORDS:
personal protective equipment; chemically dangerous substances; special properties, improvement of means; complex protection of the population

ANNOTATION

In order to provide the population and civil defence formations with modern means of individual protection deals with the world technologies of producing protective materials with special properties which are used for producing protection means against hazardous chemical substances and biological agents. Both in peacetime and in a special period there is a threat of destruction of potentially hazardous objects of nuclear power and chemical industry. In the conditions of nowadays there are changes in requirements for protective properties and time of protection means which at this stage must provide effective complex protection from negative for health and life processes and phenomena in conditions of emergencies. On the basis of the method of theoretical researches of characteristics and basic technologies in the sphere of development and production of main samples of individual protection means of skin filtering type and respiratory organs of leading countries of the world, problem questions of further perfection of individual protection means for population and formations of civil protection are examined and the approaches to their development are determined.

It is established, that functional properties of modern protection means depend in many respects on a choice of a fabric and ability to resist an external action. It was defined that an increase in the versatility of personal skin protection means of filtering type can be achieved by creating multilayer materials with special properties, by using aluminum, zinc, magnesium, titanium oxides when creating materials with self-degassing properties, and the efficiency of personal respiratory protection means is increased by increasing the protective effect of filters and insulated properties of half-masks. The directions of further research on the topic, associated with the search and implementation of nanotechnology for the creation and manufacture of modern personal protective equipment, are determined.

*УДК 614.84:629.7*

# АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ЩОДО ВПЛИВУ СИЛ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ НА ДИСПЕРСНІСТЬ КРАПЕЛЬ ПІД ЧАС ГАСІННЯ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ АВІАЦІЙНОЮ ТЕХНІКОЮ

*https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.1.55-63*

Панченко С. О.[1]*, ORCID iD 0000-0002-1781-3935
Ніжник В. В.[2],ORCID iD 0000-0003-3370-9027
Биченко А. О.[1],ORCID iD 0000-0003-3788-3268
Луценко Ю. В.[2], ORCID iD 0000-0002-9944-6760
*E-mail: panchenko_serhii@chipb.org.in

*[1]Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України*
*[2]Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Україна*

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ
*Надійшла до редакції: 18.04.2022*
*Пройшла рецензування: 09.05.2022*

КЛЮЧОВІ СЛОВА:
макрооб'єм рідини; конвективний потік пожежі; дисперсність розпилу; лісові пожежі; пожежна авіація

АНОТАЦІЯ
Проведено огляд наукових джерел і визначено закономірності щодо змін параметрів крапель у процесі трансформації рідинних масивів під час вільного падіння. Наголошено на основній причині виникнення обмежених поперечних розмірів трансформувального рідинного масиву і утвореної після його руйнування хмари дрібних крапель. У статті теоретично розкривається кореляція між ефектом стиснення водяного масиву та стадійності його дроблення залежно від високотемпературного газового середовища. Зіставлено та проаналізовано гіпотези щодо руйнування масивів рідин та описано найбільш характерні для авіаційного гасіння чотири основні стадії процесу еволюції макрооб'єму рідини та три режими коагуляції крапель рідини. Визначено основні недоліки експериментальних досліджень, які проводились з урахуванням впливу конвективних потоків на масиви рідин. Сформульовано об'єкт, предмет та завдання подальшого дослідження

**Постановка проблеми.** Працюючи над задачею щодо підвищення ефективності ліквідації пожеж авіаційною технікою, було визначено ряд напрямів для адекватної оцінки такого гасіння. Після проведеного аналізу авіаційної техніки в роботі [1] постала проблема щодо розуміння того, як відбувається трансформація вогнегасної речовини під час гасіння, а також, яким чином конвективні потоки від пожежі будуть впливати на вже трансформовані краплі рідини. У багатьох сучасних технологіях пожежогасіння, зокрема тих, що спираються на застосування крапельних рідинних потоків [2–6], основна увага приділяється оптимальному вибору розмірів крапель і компонентів вогнегасного складу. Це передусім зумовлено визначальним впливом вказаних чинників на характеристики фазових перетворень в зоні горіння. Зважаючи на те, що це дослідження є частиною дисертаційної роботи, в якій опрацьовується задача щодо підвищення ефективності використання авіаційної техніки для гасіння пожеж, ми насамперед визначаємо необхідність встановлення основних причин зміни геометричних параметрів крапель у процесі скидання водних вогнегасних речовин з авіаційної техніки, враховуючи вплив конвективних потоків від пожеж.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Теоретичні [7–11] і експериментальні [12–15] дослідження

дали змогу сформулювати основні положення теорії тепломасоперенесення і фазових перетворень під час руху крапель рідин (в тому числі суттєво неоднорідного складу) через високотемпературні газові середовища, які відповідають типовим пожежам. Встановлено характерні масштаби впливу розмірів, швидкостей руху і складу водних вогнегасних речовин на інтегральні характеристики пароутворення в зоні полуменевого горіння [6–15]. Цікавим є експериментальне і теоретичне дослідження впливу дисперсності крапель в пароводяному потоці на характеристики їх переміщення та випаровування в полуменевій зоні горіння з урахуванням можливих ефектів коагуляції.

Згідно з аналізом останніх досліджень поверхні всіх досліджуваних водяних масивів трансформувались майже однаково (зареєстровані ідентичні стадії деформації та конфігурації). Реалізацію встановлених та зареєстрованих у розглянутих роботах [15–20] чотирьох основних стадій трансформації (стиснення, витягування, розрив з утворенням ланцюжків, руйнування на дрібні краплі) можливо пояснити тим, що під час руху масиву підвищується швидкісний напір зовнішнього газового середовища на нього. Це призводить до його стиснення – утворення форми млинця. Через витягування в поперечному напрямку масиву його поздовжній розмір значно зменшується. Виникає ефект нестійкої поверхні (насамперед з підвітряної сторони), який отримав назву «нестійкість Релея-Тейлора». Причини такої нестійкості полягають в різниці щільностей рідини та газу в полі тяжіння.

**Методи дослідження.** У науковій публікації були використані методи аналізу, порівняння експериментальних даних та формально-логічні методи, засновані на результатах попередніх власних та інших наукових досліджень.

**Формулювання цілей досліджень.** Проаналізувати основні причини зміни геометричних параметрів крапель вогнегасних речовин у процесі трансформації рідинних масивів під час скидання їх з авіаційної техніки з урахуванням зміни сил поверхневого натягу та впливу конвективних потоків від пожежі. Сформувати об’єкт, предмет та завдання подальшого дослідження.

**Виклад основного матеріалу.** Основна причина обмежених поперечних розмірів трансформувального рідинного масиву і утвореної після його руйнування хмари дрібних крапель полягає в тому, що після послідовного стадійного руйнування (дроблення) масиву (спершу на великі фрагменти, потім великі розпадаються на дрібні, а останні на краплі) утворюється хмара крапель, які вже не руйнуються в умовах вільного падіння (числа Вебера не досягають граничних значень 10–12). Відповідно число крапель не збільшується, і площа горизонтальної проєкції хмари краплин, яку вони займають, майже не зростає. Завдяки виконаній відеореєстрації процесу руху крапельної хмари (внаслідок спостереження за розмірами і числом крапель) поблизу основи стенду підтверджено висновок [16].

У той же час слід зазначити, що поздовжній розмір рідинного масиву був практично у всіх експериментах більше поперечного під час відеореєстрації протяжних траєкторій (від 10 до 15 м). Цю закономірність можна пояснити тим, що краплі, які формувались на четвертій стадії трансформації масиву, мали різні розміри. Водночас розташування цих крапель щодо одна одної було різним, оскільки розрив водяних ланцюжків проходив у різних областях масиву. Внаслідок різних розмірів і розташування крапель досить часто відбувалися зіткнення останніх, спостерігалось виникнення явища коагуляції та дроблення. Це призводило до зміни дисперсності крапельної хмари і швидкості руху різних її шарів. Як наслідок, часто відбувалося розтягування крапельної хмари в поздовжньому напрямку. З урахуванням встановлених в експериментах [20] ефектів стиснення рідинних масивів (зменшення їх

поперечних розмірів унаслідок зростання буферного парового шару між водою і газами) у високотемпературних (понад 1000 К) газових середовищах можна зробити висновок про те, що максимальні поперечні розміри і відповідні площі зрошення, наведені в експериментах, для умов, що відповідають типовим лісовим пожежам, будуть на 20–30% меншими. Також у роботі [21] зазначено, що зі зростанням початкового обсягу масиву (від 0,05 до 0,5 л) ефект стиснення стає більш вираженим (особливо на початкових стадіях трансформації). Зі зростанням протяжності (наприклад, до 10–15 м) високотемпературної області ефект стиснення масиву стане визначальним. Зазначений ефект зумовлений [20–21] формуванням буферного парового шару між рідиною і високотемпературними продуктами згоряння в малій околиці кордону рідинного масиву – високотемпературними газами. Інтенсивний вдув парів рідини в цей шар призводить до зростання тиску з боку газів на масив. Як наслідок, суттєво сповільнюється процес його трансформації і збільшення розмірів під час руйнування. Відповідно до досліджень [17] цей буферний шар у разі одиночних крапель (особливо великих – більше 1 мм) істотно знижує тепловий потік до рідини і, як результат, зменшується швидкість випаровування останньої.

Процес еволюції макрооб'ємів рідини можна розділити на такі стадії: 1) рух сферичного ядра рідини; 2) поступова трансформація ядра з утворенням дископодібної конфігурації; 3) утворення пухирів («парашутів»); 4) руйнування бульбашок з утворенням рідинних «ланцюжків»; 5) формування рідиннокрапельної аерозольної хмари. Якісна картина різних стадій процесу для дистильованої води узгоджується з результатами [16–20]. Для оцінки достовірності результатів дослідження проведено порівняння залежності площі поперечного миделевого перетину рідинного ядра, віднесеній до його початкового перетину ($S/S_0$), від пройденої відстані $x$ до початку розпаду ядра [17]. Обробка відеокадрів руху макрооб'ємів дистильованої води (V = 50 ml) показала, що на початковій ділянці траєкторії руху макрооб'ємів рідини x ≤ 2 m (початок розпаду рідинного ядра) отримані значення $S / S_0$ з урахуванням похибок експериментальних даних практично збігаються з результатами [17]. Відзначимо, що в роботі [18] у разі x > 1-1.5 m спостерігалася істотна відмінність площі миделевого перетину ядра, виміряного в різних ракурсах (зйомка зверху і збоку), що свідчить про явно виражену несиметричність форми рідинного ядра.

Згідно з наступними результатами дослідження [27] впливу початкового об'єму ядра рідини залежність відстані $x_{cr}$, на якій відбувається повне його руйнування, має немонотонний характер. За малих розмірів рідинного ядра (V <20 ml) сили поверхневого натягу превалюють над силами динамічного напору (числа Вебера менше критичного значення), і відстань, на якій відбувається повне його руйнування, дорівнюватиме $x_{cr}$>220 cm. У разі збільшення розмірів ядра величина $x_{cr}$ досягає мінімального значення. З подальшим збільшенням розмірів рідинного ядра величина $x_{cr}$ монотонно зростає. Це пов'язано з тим, що після стадії руйнування бульбашок з утворенням рідинних ланцюжків рідинне ядро повністю не руйнується, а поступово зменшується в розмірах.

На рис. 1 наведені експериментальні дані щодо впливу коефіцієнта поверхневого натягу рідини $\sigma$ на відстань $x_{cr}$ для рідинного ядра з початковим обсягом 20 і 40 ml. З наведених залежностей випливає, що коефіцієнт поверхневого натягу рідини істотно впливає на динаміку руйнування макрооб'ємів рідини. У разі введення ПАР в дистильовану воду зі зменшенням коефіцієнта поверхневого натягу від 72 до 35 mN/m відстань $x_{cr}$, на якому відбувається руйнування макрооб'ємів рідини, скорочується від 255 до 185 cm [27].

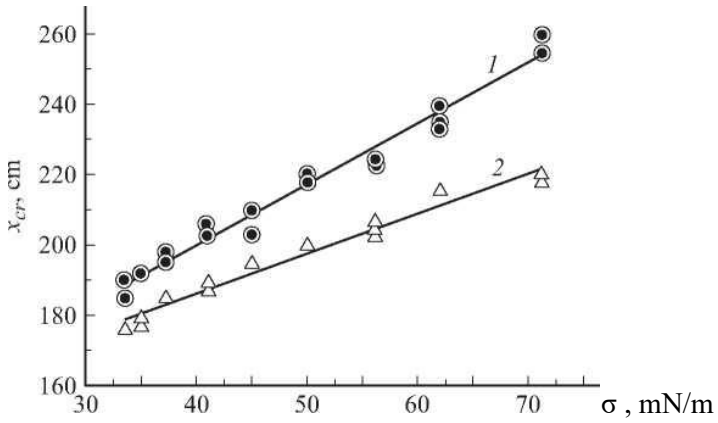



*Рисунок 1* – Залежність відстані $x_{cr}$, пройденого макрооб'ємом рідини до його повного руйнування, від коефіцієнта поверхневого натягу рідини $\sigma$. $V$ = 40 (1) і 20 (2) ml [27]

*Джерело:* розроблено авторами

В інших експериментальних дослідженнях [19–22] застосовувалися три типові системи крапель рідини – високотемпературних газів, що відрізняються взаємним розташуванням крапель. Передбачалося, що краплі води рухаються з безрозмірною швидкістю на деякій початковій відстані одна від одної $L_n$ під дією сил тяжіння і сил опору в області, заповненій високотемпературними газами (відповідними типовим продуктам згоряння). Прийнято, що початкова температура крапель $\Theta_0$ істотно нижча температури газів $\Theta_f$. Вважалося, що краплі прогріваються за рахунок теплопровідності. На межі рідина-газ відбувається їх випаровування. Пари води вдуваються у високотемпературне газове середовище і змішуються з нагрітими газами. Внаслідок ендотермічного фазового перетворення і вдування парів температура парогазової суміші в безпосередній близькості від крапель знижується. В умовах інтенсивного пароутворення розміри крапель зменшуються. Через деякий час відбувається повне випаровування крапель, що рухаються першими в сукупності (назвемо їх краплями-лідерами) Аналогічно випаровуються і всі наступні краплі.

У результаті аналізу відеограм експериментів [23–26] встановлено декілька режимів коагуляції крапель під час їх руху через полум'я. Так, зокрема, під час стеження за зміною відстаней між краплями і температури парогазової суміші в сліді крапель виявлено, що коагуляція останніх може реалізовуватися в трьох режимах:

- рухомі в сліді краплі наздоганяють попередні;
- краплі змінюють напрямок свого руху на протилежний внаслідок сил опору газового потоку і коагулюють з краплями, які рухаються слідом за ними;
- краплі внаслідок реалізації фазових перетворень коагулюють з краплями, які рухаються на деякій відстані від них.

Причини реалізації виявлених режимів коагуляції встановлені з використанням відеограм експериментів і чисельного моделювання. Так, наприклад, перший режим зумовлений істотним уповільненням руху перших крапель під час пароутворення і створенням умов (внаслідок зниження температури в сліді) для значно менш інтенсивного випаровування кожної наступної краплі. Краплі, які рухаються першими, практично зупиняються через зустрічний рух висхідних продуктів згоряння та інтенсивний винос маси під час

пароутворення, а рух наступних за ними крапель прискорюється (внаслідок зменшення швидкості фазового переходу і відпрацьованих газів у фронті руху крапель). Через певний проміжок часу ці краплі наздоганяють значно зменшені в об'ємі краплі-лідери і зливаються з ними, продовжуючи рух вже у вигляді «об'єднаних» крапель. Цей процес може тривати до повного випаровування всіх крапель розпорошеної рідини. Проведені експерименти показали, що частка випаруваних крапель залежно від їх характерних розмірів (радіус краплі $R_m$ від 0,05 мм до 2,5 мм) істотно різниться. Зокрема, встановлено, що у разі $R_m \leq 0{,}17$ мм випаровується практично 100% крапель в каналі довжиною 1 м, у разі $0{,}17 < R_m \leq 0{,}3$ мм – близько 70%, у разі $R_m \approx 0{,}5$ мм – до 20 %, а у разі $R_m \rightarrow 2{,}5$ мм – не більше 8%. Як наслідок, суттєво зменшується відносна концентрація крапель в потоці високотемпературних газів $a_m : a_m \rightarrow 0$ – для малих крапель ($R_m \leq 0{,}2$ мм); $a_m \approx 0{,}7$ – для середніх ($0{,}2 < R_m \leq 0{,}4$ мм); $a_m = 0{,}3$ – для великих (за початковими розмірами) крапель. Зміна значень $a_m$ і $R_m$ у процесі руху крапель через високотемпературні гази характеризує істотно нелінійний і нестаціонарний процеси. Очевидно, це зумовлено залежністю швидкості пароутворення $W_e$ від температури поверхні $T_e$ кожної краплі рідини. Наведені значення $W_e$ встановлені за результатами обробки експериментальних даних і проведеного чисельного моделювання. Видно, що вони істотно нелінійно (в декілька разів) збільшуються у разі зростання температури поверхні краплі. Водночас можна відзначити задовільну відмінність теоретичних і експериментальних значень $W_e$ (в тому числі у разі відносно низьких температур [26]). Зокрема, за результатами вимірювань маси і розмірів крапель на вході і виході з високотемпературного каналу встановлено, що середня швидкість випаровування води складає близько 0,241– 0,278 кг / (м$^2$·с). Чисельні дослідження показали, що температура поверхонь крапель $T_e$ у разі $T_f \approx 1100$ К може зростати від 350 до 370 К зі збільшенням часу переміщення в газовому середовищі, причому цей процес має нелінійний характер.

У результаті узагальнення експериментальних даних з використанням розроблених моделей тепломасоперенесення встановлений параметр, який можна використовувати під час чисельного визначення умов віднесення крапель газами. Так, на розгляд уведений параметр $\gamma_f$, що характеризує співвідношення сил опору $F_a$ і тяжкості $F_m$, що діють на краплю. Значення $F_a$ і $F_m$ обчислювалися відповідно до положень теорії тепломасоперенесення і гідродинаміки в газокрапельних потоках [26].

З огляду на аналіз можна сформулювати умову гальмування крапель як $\gamma_f = 1$. У разі $\gamma_f < 1$ краплі зберігають початковий напрямок руху, а у разі $\gamma_f > 1$ виносяться газовим потоком. Параметр $\gamma_f$ можна використовувати під час прогнозування другого режиму коагуляції.

Третій режим коагуляції реалізується під час руху декількох крапель різних розмірів на деякій відстані одна від одної (умовно цей рух можна назвати паралельним).

У результаті чисельного моделювання встановлено, що внаслідок випаровування крапель води і відповідно зменшення їх розмірів досить значно змінюється тиск парогазової суміші в малій околиці поверхні крапель. Крім того, у разі зменшення розмірів краплі зменшуються і характерні розміри їх «температурних слідів» (областей в сліді крапель, в яких температура продуктів згоряння знижується до помірних значень – не більше 400 К). Унаслідок зміни температури і тиску парогазової суміші між краплями за рахунок сил термо- і турбофорезу [26] відстань між паралельно переміщеними краплями $L_n$ зменшується або зростає. У разі підвищення швидкостей

випаровування крапель параметр $L_n$ зростає, у разі зниження – зменшується.

Можна зауважити, що третій режим, як правило, реалізується спільно з другим унаслідок істотної зміни швидкостей руху крапель в потоці високотемпературних продуктів згоряння. Отже, ідентифікація цих двох режимів досить складна і, як довели проведені експерименти, можлива тільки у разі використання підходів високошвидкісної «трассерної» візуалізації. У той же час пояснення причин їх реалізації можливе тільки за результатами чисельного моделювання з урахуванням всіх основних процесів тепломасоперенесення і фазових перетворень.

**Висновки та напрями подальших досліджень.** На основі комплексу проаналізованих досліджень робимо висновок, що введення ПАР у воду надає можливість змінити коефіцієнт поверхневого натягу, що своєю чергою позначає висоту, на якій буде руйнуватись макрооб'єм рідини під час наближення до площі поверхні. Через зменшення руйнування макрооб'єму буде підвищено точність скидання вогнегасної рідини та збільшено об'єм гасіння на одному кубічному метрі.

Встановлено закономірність вільного падіння рідини, а саме – розбиття макрооб'єму рідини на окремі дисперсні системи. В розглянутих дослідженнях наведені чотири види руху краплин води, які залежать від зміни параметрів впливу на масив. Зміна параметрів цих систем (відповідно й ефективність гасіння) буде залежати від ряду таких чинників: вплив високотемпературних газових потоків на масив рідини та концентрація ПАР, введених у воду.

Здійснений аналіз даних щодо впливу конвективних потоків на масив рідини, який утворюється після її скидання з авіаційної техніки, надалі дасть змогу більш детально описати процес впливу потоків газоповітряних сумішей на зміну фізичного стану рідини та здійснити опис кореляції між параметрами крапель рідини і зниженням теплового потоку від лісової пожежі, що допоможе визначити необхідні розміри крапель для підвищення ефективності гасіння авіаційною технікою.

Варто зауважити, що в зазначених дослідженнях не було достатнього обґрунтування щодо застосування конкретних видів хімічних речовин, які б мали високу ефективність під час авіаційного гасіння лісових пожеж. З урахуванням проаналізованих даних ми маємо на меті визначити необхідний склад вогнегасних речовин, які будуть давати оптимальні результати у разі їх використання за допомогою авіаційної техніки в Україні. У наведених дослідженнях немає експериментальних даних для підтвердження теорії буферного парового проміжку та використання ряду коефіцієнтів, які б враховували інтенсивність горіння, силу вітру, швидкість літака та інших ключових параметрів, які є критично важливими під час авіаційного гасіння пожеж.

Отже, актуальним питанням на сьогодні є дослідження процесів диспергування водних вогнегасних речовин під час подавання їх із авіаційної техніки, що й стане надалі об'єктом наших наукових розвідок. З огляду на це можна зробити висновок, що предметом дослідження буде вплив сил поверхневого натягу водних вогнегасних речовин на дисперсність розпилу водних вогнегасних речовин під час подавання їх з авіаційної техніки для гасіння пожеж.

Окреслено такі основні задачі на перспективу:

1. Провести аналіз сучасного стану щодо використання авіаційної техніки під час гасіння лісових пожеж.

2. Обґрунтувати математичні моделі, які описують процес подавання вогнегасної речовини з літака в осередок пожежі.

3. Розробити методику експериментальних досліджень з визначення вогнегасної ефективності водних розчинів залежно від їх дисперсності.

4. Дослідити закономірності зміни дисперсності розпилу водних вогнегасних розчинів залежно від умов скидання їх з авіаційної техніки.

5. Проаналізувати ефективність розробленого методу за допомогою математичного та комп'ютерного моделювання.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ


1. Тенденції застосування авіаційної техніки для гасіння пожеж / С. О. Панченко та ін. *Надзвичайні ситуації та ліквідація.* 2021. Т. 5 № 1. С. 104–114.
2. Wighus R. Water mist fire suppression technology – status and gaps in knowledge. Proceedings of the International Water Mist Conference. Vienna, 2001. P. 1–26.
3. Karpov A. I., Novozhilov V. B., Galat A. A., Bulgakov V. K. Numerical modeling of the effect of fine water mist on the small scale flame spreading over solid combustibles. *Fire Safety Science* : Proceeding of Eight International Symposium. 2005. Vol. 27. P. 753– 764.
4. Sokovikov V. V., Tugov A. N., GrishinV. V., KamyshevV. N. Automatic water fire extinguishing with using of sprayed water at power plants. *Energetik – Power Engineer*. 2008. № 6. P. 37–38.
5. Korol'chenko D. A., Gromovoy V. Yu., Vorogushin O. O. Fire extinguishing in tall buildings by using water mist systems. *Fire and Explosion Safety*. 2011. Vol. 20, № 9. P. 54–57.
6. Abbud-Madrid A., Watson D., McKinnon J. T. On the effectiveness of carbon dioxide, nitrogen and water mist for the suppression and extinction of spacecraft fires. *Suppression and Detection Research and Applications Conference*. Orlando, USA. 2007.
7. Carriere T., Butz J. R., Naha S., Brewer A., Abbud-Madrid A. Fire suppression test using a handheld water mist extinguisher designed for the International Space Station. *42rd International Conference on Environmental Systems*. California, USA. 2012.
8. Rodriquez B., Young G. Development of International Space Station fine water mist portable fire extinquisher. *43rd International Conference on Environmental Systems.* 2013.
9. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P.A. Numerical estimation of optimum sizes for water drops at the conditions of its dispersion by firefighting devices at placements. *Fire and Explosion Safety*. 2012. Vol. 21. № 5. P. 74– 78.
10. Strizhak P. A. Numerical investigation of evaporation conditions for set of water drops at the moving after high temperature gas mixture. *Fire and Explosion Safety.* 2012. Vol. 21. № 8. P. 26–31.
11. Strizhak P. A. Numerical *analysis* of evaporation process for droplet moving at the water jet through high temperature combustion products. *Fire and Explosion Safety.* 2012. Vol. 21. № 9. P. 17–22.
12. Glushkov D. O., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Numerical research of heat- and-mass transfer at movement of water drops «tandem» in the hight temperature gas mixture. *Thermal Processes in Engineering*. 2012. Vol. 21. № 12. P. 531–538.
13. Vysokomornaya O. V., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Heat-and-mass transfer at water drops movement in the high- temperature gas mixture. *Jornal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2013. Vol. 86. № 1. P. 59–65.
14. Strizhak P. A. Influence of droplet distribution in a «water slug» on the temperature and concentration of combustion products in its wake. *Jornal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2013. Vol. 86. № 4. P. 839–848.
15. Volkov R. S., Vysokomornaya O. V., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Experimental study of the change in the mass of water droplets in their motion through high-temperature combustion products. *Jornal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2013. Vol. 86. № 6. P. 1327–1332.
16. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., StrizhakP. A. Experimental investigation of evaporation integrity for sprayed water at moving through flame. *Fire and Explosion Safety.* 2013. Vol. 22. № 10. P. 15–24.
17. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P.A. Experimental investigation of sprayed extinguishing liquid drops moving features on the entering into the flame. *Fire and Explosion Safety*. 2013. Vol. 22. № 12. P. 16–23.
18. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Evaporation of two liquid droplets moving sequentially through high-temperature combustion products. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2014. Vol. 21. № 2. P. 269–272.
19. Волков Р. С., Забелин М. В., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. *Листи в ЖТФ.* 2016. Т. 42. № 5. С. 65.
20. Мешков Е. Е., Орешков В. О., Янбаев Г. М. *Листи в ЖТФ.* 2011. Т. 37. № 15. С. 79.
21. Janiszewski J. Measurement procedure of ring motion with the use of high speed camera during electromagnetic expansion. *Metrology and Measurement Systems*. 2012. Vol. 19. № 4. P. 797–804.
22. Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. The ignition features of steam-gas mix by the metal particle heated to high temperatures. *Fire and Explosion Safety.* 2008. Vol. 17. № 3. P. 26–32.
23. Zakharevich A. V., Strizhak P. A. Fire danger of interaction of limited heat content sources with flammable liquids. *Fire and Explosion Safety.* 2011. № 4. P. 70–75.
24. Glushkov D. O., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Numerical simulation of solid-phase ignition of metallized condensed matter by a particle heated to a high temperature. *Physical Chemistry*. 2011. № 12. P. 35–42.
25. Zhdanova A. O., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Influence of water droplets distribution in the «water shell» on temperature in follow movement. *Fire and Explosion Safety.* 2013. Vol. 22. № 2. P. 9–17.
26. Terekhov V. I., Pakhomov M. A. Heat-and-mass transfer and hydrodynamics in a gas-droplet streams. *Publishing House of the NSTU*. 2009. 284 p.
27. Arhipov B. A., Basalaev S. A., Zolotarev N. N. Influence of surface tension on the destruction of the liquid macrovolume during its free fall. *Листи в ЖТФ*. 2020. Т. 46, Вип. 3


## REFERENCES


1. Panchenko, S., Nizhnyk, V., & Bychenko A. (2021). Tendentsii zastosuvannia aviatsiinoi tekhniky dlia hasinnia pozhezh [Trends of application an aviation for extinguishing fires]. Nadzvychaini sytuatsii ta likvidatsiia, 5, №1, 104-114. Doi : https://doi.org/10.31731/2524-2636.2021.5.1.104.114 [in Ukrainian].
2. Wighus, R. (2001). Water mist fire suppression technology – status and gaps in knowledge. Proceedings of the International Water Mist Conference, Vienna, 2001, 1–26. [in English].

3. Karpov, A. I., Novozhilov, V. B., Galat, A. A., & Bulgakov, V. K. (2005). Numerical modeling of the effect of fine water mist on the small scale flame spreading over solid combustibles. Fire Safety Science : Proceeding of Eight International Symposium, 27, 753– 764. [in English].
4. Sokovikov, V. V., Tugov, A. N., Grishin, V. V., & Kamyshev, V. N. (2008). Avtomaticheskoye vodyanoye pozharotusheniye s primeneniyem tonkoraspylennoy vody na elektrostantsiyakh [Automatic water fire extingu¬ishing with using of sprayed water at power plants]. Energetik – Power Engineer, 2008, no. 6, 37–38. [in russian].
5. Korol'chenko, D. A., Gromovoy, V. Yu., & Vorogushin, O. O. (2011). Primeneniye tonkoraspylennoy vody dlya tusheniya pozharov v vysotnykh zdaniyakh [Fire extinguishing in tall buildings by using water mist systems]. Pozharovzryvobezopasnost – Fire and Explosion Safety, 2011, vol. 20, no. 9. 54–57. [in russian].
6. Abbud-Madrid, A., Watson, D., & McKinnon, J. T. (2007). On the effectiveness of carbon dioxide, nitrogen and water mist for the suppression and extinction of spacecraft fires. Suppression and Detection Research and Applications Conference, Orlando, USA. [in English].
7. Carriere T., Butz J. R., Naha S., Brewer A., & Abbud-Madrid A. (2012). Fire suppression test using a handheld water mist extinguisher designed for the International Space Station. 42rd International Conference on Environmental Systems, California, USA. [in English].
8. Rodriquez, B., & Young, G. (2013). Development of International Space Station fine water mist portable fire extinquisher. 43rdInternational Conference on Environmental Systems, Vail, CO. [in English].
9. Volkov, R. S., Kuznetsov, G. V., & Strizhak, P. A. (2012). Chislennaya otsenka optimalnykh razmerov kapel vody v usloviyakh yeye raspyleniya sredstvami pozharotusheniya v pomeshcheniyakh [Numerical estimation of optimum sizes for water drops at the conditions of its dispersion by firefighting devices at place¬ments]. Pozharovzryvobezopasnost – Fire and Explosion Safety, 2012, vol. 21, no. 5, pp. 74–78. [in russian].
10. Strizhak, P. A. (2012). Chislennoye issledovaniye usloviy ispareniya sovokupnosti kapel vody pri dvizhenii v vysokotemperaturnoy gazovoy srede [Numerical investigation of evaporation conditions for set of water drops at the moving after high temperature gas mixture]. Pozharovzryvobezopasnost – Fire and Explosion Safety, vol. 21, no. 8, pp. 26–31. [in russian].
11. Strizhak, P. A. (2012). Chislennyy analiz protsessa ispareniya kapli, dvizhushcheysya v struye vody cherez vysokoskorostnyye produkty sgoraniya [Numerical analysis of evaporation process for droplet moving at the water jet through high temperature combustion products]. Pozharovzryvobezopasnost – Fire and Explosion Safety, vol. 21, no. 9, pp. 17–22. [in russian].
12. Glushkov, D. O., Kuznetsov, G. V., & Strizhak, P. A. (2012). Chislennoye issledovaniye teplomassoperenosa pri dvizhenii «tandem» kapel vody v vysokotemperaturnoy gazovoy srede [Numerical research of heat- and-mass transfer at movement of water drops «tandem» in the hight temperature gas mixture]. Teplovyye protsessy v tekhnike – Thermal Processes in Engineering, vol. 21, no. 12, pp. 531–538. [in russian].
13. Vysokomornaya, O. V., Kuznetsov, G. V., & Strizhak, P. A. (2013). Teplomassoperenos pri dvizhenii kapel vody v vysokotemperaturnoy gazovoy srede [Heat-and-mass transfer at water drops movement in the high- temperature gas mixture]. Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal – Jornal of Engineering Physics and Thermophysics, vol. 86, no. 1, pp. 59–65. [in russian].
14. Strizhak, P. A. (2013). Vliyaniye raspredeleniyakapel v «vodyanom snaryade» natemperaturui kontsentratsiyu produktov sgoraniya v yego slede [Influence of droplet distribution in a «water slug» on the temperature and concentration of combustion products in its wake]. Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal – Jornal of Engineering Physics and Thermophysics, vol. 86, no. 4, pp. 839–848. [in russian].
15. Volkov, R. S., Vysokomornaya, O. V., Kuznetsov, G. V., & Strizhak, P. A. (2013). Eksperimentalnoye issledovaniye izmeneniya massy kapel vody pri ikh dvizhenii cherez vysokotemperaturnyye produkty sgoraniya [Experimental study of the change in the mass of water droplets in their motion through high-temperature combustion products]. Inzhenemo-fizicheskiy zhurnal – Jornal of Engineering Physics and Thermophysics, vol. 86, no. 6, pp. 1327–1332. [in russian].
16. Volkov, R. S., Kuznetsov, G. V., & Strizhak, P. A. (2013). Eksperimentalnoye issledovaniyepolnoty ispareniya ras- pylennoy vody pri yeye dvizhenii cherez plamya [Experimental investigation of evaporation integrity for sprayed water at moving through flame]. Pozharovzryvobezopasnost – Fire and Explosion Safety, vol. 22, no. 10, pp. 15–24. [in russian].
17. Volkov, R. S., Kuznetsov, G. V., & Strizhak, P. A. (2013). Eksperimentalnoye issledovaniye osobennostey dvizheniya kapel raspylennoy tushashchey zhidkosti na vkhode v zonu plameni [Experimental investigation of sprayed extinguishing liquid drops moving features on the entering into the flame]. Pozharovzryvobezopasnost – Fire and Explosion Safety, vol. 22, no. 12, pp. 16– 23. [in russian].
18. Volkov, R. S., Kuznetsov, G. V., & Strizhak, P. A. (2014). Osobennosti ispareniya dvukhkapel vody, dvizhushchikh- sya posledovatelno cherez vysokotemperaturnyye produkty sgoraniya [Evaporation of two liquid droplets moving sequentially through high-temperature combustion products]. Teplofizika i aeromekhanika – Thermophysics and Aeromechanics, vol. 21, no. 2, pp. 269–272. [in russian].
19. Volkov, P.C., Zabelyn, M.V., Kuznetsov, H.V., & Stryzhak, P.A. (2016). On optimization of forest fire extinguishing management by inhibitor solution. Pysma v ZhTF, T. 42, № 5, pp. 65. [in russian].
20. Meshkov, E.E., Oreshkov, V.O., & Yanbaev, H.M. (2011). Formation, dynamics and evaporation of a cluster of dispersed phase particles in the graivitational field. Pysma v ZhTF, T. 37, № 15, pp. 79. [in russian].
21. Janiszewski, J. (2012). Measurement procedure of ring motion with the use of high speed camera during electromagnetic expansion. Metrology and Measurement Systems. Vol. 19, No. 4, pp. 797–804. Doi : 10.2478/v10178-012-0071-2 [in English].
22. Kuznetsov, G. V., & Strizhak, P. A. (2008). Osobennosti zazhiganiya parogazovoy smesi nagretoy do vysokikh temperatur metallicheskoy chastitsey [The ignition features of steam-gas mix by the metal particle heated to high temperatures]. Pozharovzryvobezopasnost – Fire and Explosion Safety, vol. 17, no. 3, pp. 26–32. [in russian].
23. Zakharevich, A. V., & Strizhak, P. A. (2011). Pozharnaya opasnost vzaimodeystviya istochnikov ogranichennogo teplosoderzhaniya s legkovosplamenyayushchimisya zhidkostyami [Fire danger of interaction of limited heat content sources with flammable liquids]. Pozharnaya bezopasnost – Fire Safety, no. 4, pp. 70–75. [in russian].
24. Glushkov, D. O., Kuznetsov, G. V., & Strizhak, P. A. (2011). Chislennoye modelirovaniye tverdofaznogo zazhiga- niya metallizirovannogo kondensirovannogo veshchestva nagretoy do vysokikh temperatur chastitsey [Numerical simulation of solid-phase ignition of metallized condensed matter by a particle heated to a high temperature]. Khimicheskaya fizika – Physical Chemistry, no. 12, pp. 35–42. [in russian].

25. Zhdanova, A. O., Kuznetsov, G. V., & Strizhak, P. A. (2013). Vliyaniye raspredeleniya kapel vody v «vodyanom snaryade» na temperaturu v yego slede [Influence of water droplets distribution in the «water shell» on temperature in follow movement]. Pozharovzryvobezopasnost – Fire and Explosion Safety, vol. 22, no. 2, pp. 9–17. [in russian].
26. Terekhov, V. I., & Pakhomov, M. A. (2009). Teplomassoperenos i gidrodinamika v gazokapelnykh potokakh [Heat-and-mass transfer and hydrodynamics in a gas-droplet streams]. Publishing House of the NSTU, 284 p. [in russian].
27. Perfyleva, N. N., & Usanyna, A. S. (2020). Vlyianye poverkhnostnoho natiazhenyia na razrushenye makroobema zhydkosty pry eho svobodnom padenyy [Influence of surface tension on the destruction of the liquid macrovolume during its free fall] Letters in ZhTF, 46, 3. DOI : 10.21883/PJTF.2020.03.48989.17970 [in russian].

# ANALYSIS OF RESEARCH ON THE INFLUENCE OF SURFACE TENSION FORCES ON THE DISPERSITY OF DROPLETS DURING EXTINGUISHING FOREST FIRES BY AVIATION EQUIPMENT

*S. Panchenko[1], V. Nizhnyk[2], A. Bychenko[1], Yu. Lutsenko[2]*
*[1]Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes National University of Civil Defence of Ukraine*
*[2]Institute of Public Administration and Research in Civil Protection, Ukraine*

KEYWORDS:

macro volume of liquid; convective flow of fire; dispersion of the spray; forest fires; fire aircraft

ANNOTATION

The literature review is carried out and regularities concerning changes of parameters of drops in the course of transformation of liquid massifs during free fall are defined. The main reason for the limited transverse dimensions of the transforming liquid mass and the cloud of small droplets formed after its destruction is determined. The correlation between the effect of compression of the water mass and the stages of its crushing depending on the high-temperature gaseous medium is established. There are 4 stages of the process of evolution the macro-volume liquid and 3 modes of coagulation of liquid droplets. Characteristic features of droplet collision taking into account the influence of convective flows are described. As a result of the analysis of videograms of experiments several modes of coagulation of drops at their movement through a flame are established. In particular, when monitoring the change in the distances between the drops and the temperature of the vapor-gas mixture in the trace of the drops, it was found that the coagulation of the latter can be realized in three modes:

• moving in the footsteps drops catch up with the previous ones;
• droplets change the direction of their movement to the opposite due to the resistance of the gas flow and coagulate with the droplets moving after them;
• droplets due to the implementation of phase transformations coagulate with droplets that move at some distance from them.

In the analysis of the modes of coagulation of water droplets in the field of high-temperature gases, the characteristic features of droplet collision are established. Experiments have shown that at «tangential» collision of two drops (especially at difference of their characteristic sizes several times) there is their short-term merger and then crushing into two drops with the sizes close to initial. At «frontal» collision of drops there is their merger and further movement. continues the «combined» drop. At the same time, experiments have shown that the characteristics of the processes of collision of droplets change significantly when varying the size and speed of movement of droplets, as well as the angles of intersection of the trajectories of their movement.

*УДК 614.839*

# РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИКИ ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМ ЛЕГКОСКИДНИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ОСНОВІ ГНУЧКИХ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

*https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.1.64-71*

Ніжник В. В.[1], ORCID iD 0000-0003-3370-9027
Поздєєв С. В.[2],ORCID iD 0000-0002- 9085-0513
Добряк Д. О.[1]* ORCID iD 0000-0002-2360-3520
Підгорецький Ю. Ю.[2],ORCID iD 0000-0002-0888-1442
Потетня К. В.[3] ORCID iD 0000-0003-2381-4026
Крикун О. М.[1] ORCID iD 0000-0001-8132-9788
*E-mail: vdb211@ukr.net

*[1]Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Україна*
*[2]Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, Україна*
*[3]ТОВ «Легкоскидні конструкції», Україна*

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ
*Надійшла до редакції: 09.05.2022*
*Пройшла рецензування: 14.06.2022*

КЛЮЧОВІ СЛОВА:
вибух; параметри легкоскидних конструкцій; надійність розкриття; критичне значення надлишкового тиску вибуху

АНОТАЦІЯ
Висвітлено тему розроблення методики визначення параметрів легкоскидних конструкцій (далі – ЛСК) на основі гнучких полімерних матеріалів (далі – ГПМ) для їх гарантованого розкриття за умов досягнення критичного значення надлишкового тиску вибуху. За допомогою запропонованого рівняння, в якому розміри прорізу ЛСК на основі ГПМ є незалежними змінними, було побудовано номограми для визначення геометричних розмірів прорізів ЛСК на основі ГПМ. Для перевірки отриманих за допомогою розроблених номограм результатів було побудовано математичні моделі ГПМ у замках стандартного віконного профілю і проведено чисельні експерименти з їх використанням. Показано, що отримані за номограмами результати є адекватними, оскільки для всіх випадків максимального тиску розкриття відбувалося у 100% ЛСК на основі ГПМ. Розроблена методика має просту реалізацію та економічні розрахункові алгоритми, що дає змогу здійснювати проєктування ефективних ЛСК на основі ГПМ.

**Постановка проблеми.** Статистичні дані щодо надзвичайних ситуацій в Україні свідчать про збільшення їх кількості унаслідок пожеж і вибухів у будівлях і спорудах [1].

З метою запобігання руйнувальному впливу вибухів застосовуються ЛСК, основними характеристиками яких є площа, спосіб розкриття тощо.

Аналіз чинних нормативних документів [2] показав, що на сьогодні вимоги до характеристик ЛСК обмежено визначенням площі залежно від об'єму приміщення та його категорії. Також встановлено перелік конструкцій, які можуть виконувати функцію ЛСК. Водночас немає можливості оцінити ЛСК, що виготовляються із нових будівельних матеріалів.

Таким чином, нині є актуальним питання визначення параметрів ЛСК на основі ГПМ для їх гарантованого розкриття за умов досягнення критичного значення надлишкового тиску вибуху.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** З огляду на з аналіз чинних нормативних документів на сьогодні вимоги до характеристик ЛСК обмежені визначенням переліку матеріалів їх виготовлення, їх площі залежно від об'єму приміщення та його категорії, що потрібно

визначати розрахунком [2–4]. У сфері протипожежного нормування рекомендацій з розрахунків параметрів ЛСК нині в Україні немає. Існує зарубіжна методика розрахунків вибухостійкості будинків у разі внутрішнього дефлаграційного вибуху газоповітряних сумішей [5]. Цей посібник має досить широку сферу використання та рекомендований для проєктування виробництв, де внаслідок аварії можуть утворитися газо-, паро-, пилоповітряні суміші. У 2006 р. розроблено «Технічний кодекс встановленої практики», що чинний у Республіці Білорусь – ТКП 45- 2.02- 38- 2006 (02250), в якому встановлено порядок розрахунку площі ЛСК, призначених для захисту будівель і споруд у разі дефлаграційного вибуху всередині приміщень [6]. Функціонують і закордонні стандарти, наприклад NFPA 68 (США) [7], BS EN 14491:2012 (Великобританія) [8]. Ці стандарти застосовуються до проєктування, розміщення, монтажу, технічного обслуговування та використання приладів і систем, що видаляють гази та зменшують тиск, який виникає внаслідок дефлаграції всередині корпусу, щоб мінімізувати структурні та механічні пошкодження. Варто виділити роботи українських вчених, які проводили дослідження поведінки елементів легкоскидних конструкцій в умовах надлишкового тиску вибуху [9–14].

**Формулювання цілей досліджень.** Метою є обґрунтування розробленої методики проєктування та визначення параметрів ЛСК на основі ГПМ.

**Методи дослідження.** У роботі для досягнення поставленої мети використовувався комплексний метод досліджень, а саме: теоретичні дослідження, аналіз, синтез, аналогію, порівняння, узагальнення, систематизацію, комп'ютерне моделювання, інженерні розрахункові методики, метод простих ітерацій, лінійної інтерполяції.

Під час визначення проєктних характеристик ЛСК на основі ГПМ застосовуються прості інженерні розрахункові методики.

За допомогою лінійної інтерполяції визначається мінімальна ширина прорізу секції ГПМ. Побудовано номограми для визначення конструктивного параметра за певного надлишкового тиску, для якого має бути забезпечено розкриття ЛСК на основі ГПМ різної товщини. Для перевірки адекватності розроблених моделей використано математичний апарат і проведено чисельний експеримент. Для моделювання процесу деформування ГПМ у стандартному віконному профілі застосовується метод кінцевих елементів у реалізації розрахунків за явним методом. Також у роботі застосовані планарні кінцеві елементи (КЕ) за схемою Беличко-Цая для реалізації розрахунків.

**Виклад основного матеріалу**. Для досягнення зазначеної мети поставлено та вирішено такі завдання дослідження:

за допомогою рівняння, у якому розміри прорізу ЛСК на основі ГПМ є незалежними змінними, побудувати номограми для визначення геометричних розмірів прорізів ЛСК на основі ГПМ;

для перевірки адекватності отриманих за допомогою розроблених номограм результатів побудувати математичні моделі ГПМ у замках стандартного віконного профілю і провести чисельний експеримент з їх використанням.

Під час проєктування ЛСК на основі ГПМ як основні конструктивні параметри мають бути визначені ширина a (найменший розмір) та висота b (найбільший розмір) прорізів рам віконного профілю. Для цього можна використати рівняння рівноваги. Критичний прогин має бути визначений за значеннями критичних переміщень країв ГПМ у вузлах кріплення. В результаті математичних перетворень була отримана формула для критичного прогину з урахуванням найменшого розміру прорізу ЛСК, що має такий вигляд [9; 15]:

$$w_{\text{кр}} = \frac{9a^2}{\pi(\alpha - 2\Delta x_{\text{кр}})} - \frac{12a}{\pi} + \frac{3}{\pi}(\alpha - 2\Delta x_{\text{кр}}) \quad (1)$$

де $x_{\text{кр}}$ – максимальне переміщення краю ГПМ, коли він виходить із замків

стандартного віконного профілю секції ЛСК.

Використовуючи відповідні конструктивні параметри a та b як змінні, отримаємо кінцевий вигляд рівняння [9–10; 13–14]:

$$P_{вид}ab-\left[\frac{9a^2}{\pi\left(a-2\Delta x_{кр}\right)}-\frac{12a}{\pi}+\frac{3}{\pi}\left(a-2\Delta x_{кр}\right)\right]\frac{\pi^6 abD_h}{16}\left[\sum_{m=0}^{\infty}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{(-1)^{\frac{(2m+1)+(2n+1)}{2}-1}}{(2m+1)(2n+1)\left(\frac{(2m+1)^2}{a^2}+\frac{(2n+1)^2}{b^2}\right)^2}\right]^{-1} \quad (2)$$

$$-\frac{2q_{тр}\left(\frac{9a^2}{\pi\left(a-2\Delta x_{кр}\right)}-\frac{12a}{\pi}+\frac{3}{\pi}\left(a-2\Delta x_{кр}\right)\right)b\pi}{\sqrt{a^2+\pi^2\left(\frac{9a^2}{\pi\left(a-2\Delta x_{кр}\right)}-\frac{12a}{\pi}+\frac{3}{\pi}\left(a-2\Delta x_{кр}\right)\right)^2}}-\frac{2q_{тр}\left(\frac{9a^2}{\pi\left(a-2\Delta x_{кр}\right)}-\frac{12a}{\pi}+\frac{3}{\pi}\left(a-2\Delta x_{кр}\right)\right)a\pi}{\sqrt{b^2+\pi^2\left(\frac{9a^2}{\pi\left(a-2\Delta x_{кр}\right)}-\frac{12a}{\pi}+\frac{3}{\pi}\left(a-2\Delta x_{кр}\right)\right)^2}}=0$$

де a та b – змінні конструктивні параметри, що дає змогу зафіксувати зв'язок між ними.

Розв'язуючи рівняння (2) методом простих ітерацій за методикою, що описана у роботі [10; 16], було побудовано номограми (рис. 2) для визначення параметра, а залежно від параметра b за певного надлишкового тиску, для якого має бути забезпечено відкриття ЛСК на основі ГПМ різної товщини.

Надлишковий тиск визначається з попереднього розрахунку, а висота прорізу секції ЛСК може бути встановлена з огляду на дизайн приміщення та зручність розташування секцій ЛСК у приміщенні. У разі вибору висоти секцій ЛСК існує обмеження, що висота прорізу секції ЛСК має бути не меншою за 500 мм. Під час використання номограм для визначення конструктивного параметра, а за проміжними значеннями надлишкового тиску вибуху та висоти прорізу секції ЛСК можна застосовувати лінійну інтерполяцію.

Таким чином, методика підбирання конструктивних параметрів секцій ЛСК на основі ГПМ полягає у виконанні таких процедур [10].

1. Відповідно до номограм вибирається мінімальна висота секції ЛСК з огляду на вимоги дизайну та архітектури відповідного поверху. Тобто висота може бути встановлена проєктувальником-конструктором будівлі.

2. За допомогою попереднього розрахунку визначається величина надлишкового тиску вибуху.

3. Товщина ГПМ підбирається залежно від розташування ЛСК. У внутрішніх приміщеннях застосовуються ГПМ товщиною 4 мм. В огородженні будівлі від зовнішнього простору мають встановлюватися ГПМ товщиною 8 мм. Встановлення ГПМ товщиною 6 мм потребує додаткового обґрунтування з урахуванням вітрових навантажень у зазначеній місцевості.

4. Через лінійну інтерполяцію визначається мінімальна ширина прорізу секції ГПМ. У разі кінцевого приймання ширини прорізу можуть бути враховані дизайнерські або архітектурні рішення через збільшення ширини прорізу від визначеного мінімального значення, але не більше за 1,75 м.

Для перевірки адекватності розроблених моделей можна використати математичний апарат і провести чисельний експеримент. З огляду на це результатом такого чисельного експерименту може бути інформація про повне (часткове) розкриття ЛСК або не розкриття. Математичний апарат дає змогу враховувати всі особливості деформування системи. Під час формулювання задачі було застосовано такі основні припущення та посилання [9].

1. Для моделювання процесу деформування ГПМ у стандартному віконному профілі застосовується метод

кінцевих елементів у реалізації розрахунків за явним методом.

2. Для реалізації розрахунків застосовані планарні кінцеві елементи (КЕ) за схемою Беличко-Цая [17–21], що включає інтегрування за товщиною за п'ятьма внутрішніми точками.

3. ГПМ моделюється як неоднорідна структура із відтворенням кожної перетинки, що відповідає їх реальним розмірам.

4. Матеріал ГПМ є ізотропним нелінійно деформованим із двох лінійною діаграмою типу діаграми Прандтля.

5. Під час розв'язання задачі має бути врахована геометрична та фізична нелінійність із наявними процесами тертя країв ГПМ у замках стандартного віконного профілю.

6. За критерій повного спрацювання ЛСК береться повний вихід країв ГПМ за краї пластини, що моделює замки стандартного віконного профілю. Якщо відбувається частковий вихід або вихід не відбувається, вважається, що ЛСК не спрацювала [9].

У разі проведення обчислень має бути врахована фізична нелінійність, застосовується модель матеріалу, в основі якої лежить діаграма деформування.

Матеріал у пружній зоні деформується згідно із узагальненим законом Гука, за яким компоненти девіатора напружень Коши визначається за виразом [12; 17]:

$$S_{ij} = 2G\mathcal{E}_{i,j} \qquad (3)$$

Настання пластичних деформацій фіксуються у разі виконання умови фон Мізеса [12; 17]:

$$\phi = J_2 - \sigma_y^2/3 = 0 \qquad (4)$$

де $J_2$ – другий інваріант тензора напружень.

Поточне напруження пластичності визначається за формулою:

$$\sigma_y = \sigma_0 + E_p\mathcal{E}_{eff}^p \qquad (5)$$

Ефективну пластичну деформацію визначають за формулою:

$$\mathcal{E}_{eff}^p = \int_0^t \sqrt{\frac{2}{3}d\mathcal{E}_{ij}^p}\, d\mathcal{E}_{ij}^p \qquad (6)$$

Тиск на контактувальну поверхню визначається за виразом:

$$E_p = \frac{EE_t}{E-E_t}, \qquad (7)$$

де E та $E_t$ – відповідно модуль пружності на пружній ділянці та тангенціальний модуль пружності на пластичній ділянці.

Тиск на контактну поверхню визначають за виразом:

$$p = E_b\left(\frac{1}{V} - 1\right) \qquad (8)$$

де $E_b$ – об'ємний модуль пружності;

V – відносний об'єм.

Для перевірки адекватності результатів розробленої методики було взято навантаження, що відповідає найбільш використовуваному критерію надлишкового тиску, що дорівнює 5 кПа. Згідно із результатами досліджень у роботах [12; 18–21] тиск під час вибуху змінюється за кривою, що наведена на рис. 1.

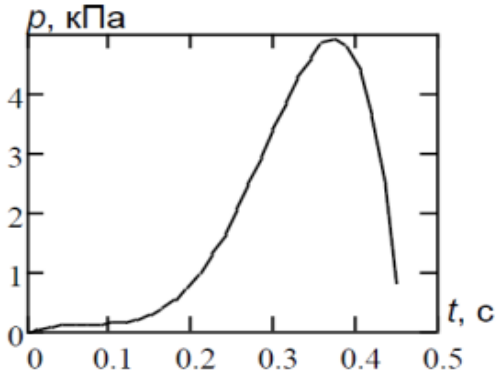
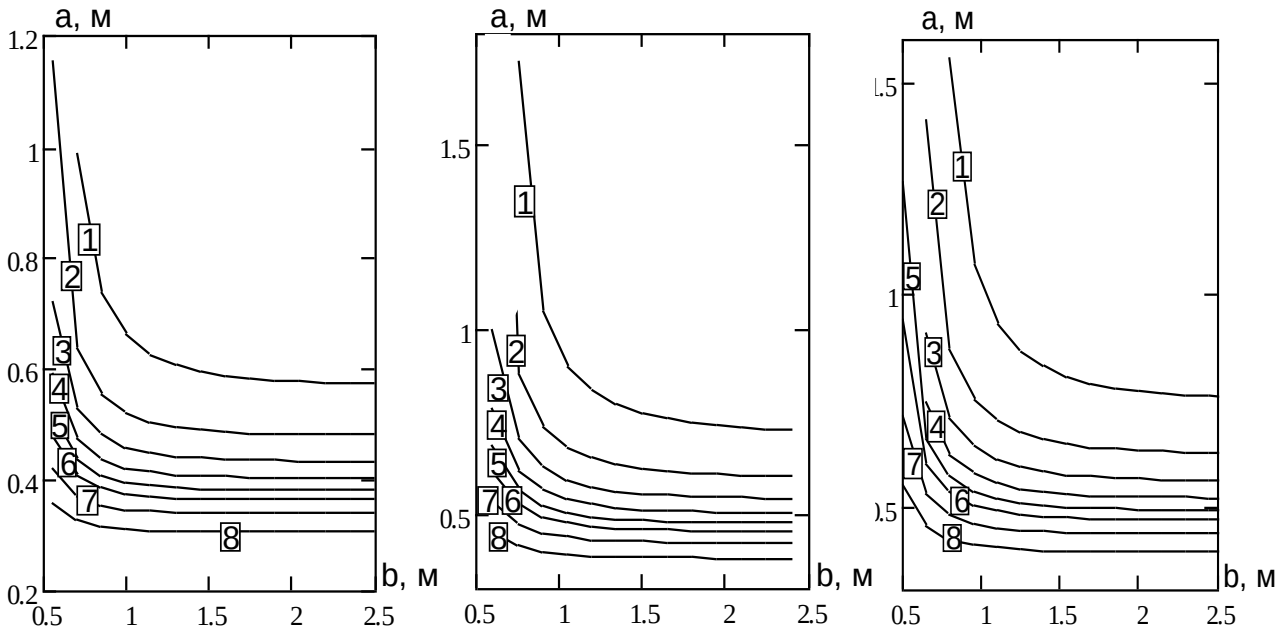



*Рисунок 1* – Графік зміни тиску вибуху залежно від часу із максимальним надлишковим тиском вибуху 5 кПа

*Джерело:* розроблено авторами

Використовуючи формулу (2) побудовано монограми визначення конструктивних параметрів ЛСК під дією надлишкового тику вибуху (рис. 2).




*а*. *б*. *в*.

*Рисунок 2* – Номограми для визначення параметра *a*, залежно від параметра *b,* ЛСК на основі ГПМ товщиною 4 мм (*а*), товщиною 6 мм (*б*) та товщиною 8 мм (*в*) за певного надлишкового тиску, для якого потрібно забезпечити розкриття: 1 – 2500 Па; 2 – 5000 Па; 3 – 7500 Па; 4 – 10000 Па; 5 – 12500 Па; 6 – 15000 Па; 7 – 20000 Па; 8 – 30000 Па

*Джерело:* розроблено авторами

Під час накладення сітки з кінцевих елементів (КЕ) були вибрані відповідний тип КЕ – планарні оболонкові КЕ типу Беличко-Цая з п’ятьма точками інтегрування
за товщиною. [9].

Відповідно до зазначеного типу обраного кінцевого елементу було побудовано кінцево-елементну схему ГПМ у замку стандартного віконного профілю. На вказаній схемі виділені кінцеві елементи, що мають різний тип матеріалу і належать різним частинам, для яких виконуються всі співвідношення та умови контакту. Побудована кінцево-елементна схема, що наведена на рис. 3.

За результатами розрахунку було отримано дані щодо параметрів напружено-деформованого стану ГПМ та його переміщення під час динамічного впливу вибуху. На рис. 4 наведено положення ГПМ у різні моменти часу щодо замка віконного профілю.

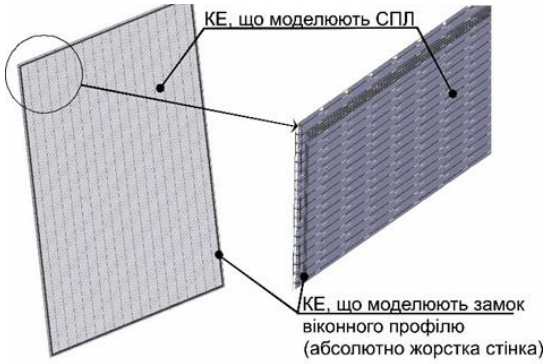



*Рисунок 3* – Кінцево-елементна схема стільникового полікарбонатного листа разом із замком стандартного віконного профілю

*Джерело:* розроблено авторами

Повне розкриття ГПМ із замків віконного профілю відбувається у момент часу 0.16 с.

Кінцевим результатом розрахунку було визначення умов повного розкриття прорізу із ГПМ. У табл. 1 наведені дані про відносний процент ГПМ, що повністю розкрилися.

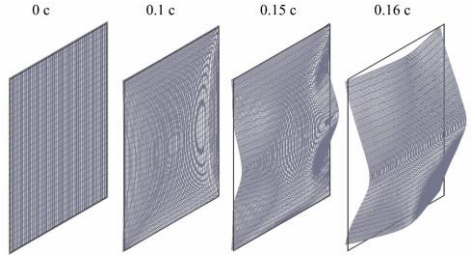



*Рисунок 4* – Положення ГПМ у різні моменти часу під дією надлишкового тиску вибуху щодо замка віконного профілю

*Джерело:* розроблено авторами

Таблиця 1 – Дані щодо розкриття ГПМ в умовах вибуху із мінімальними розмірами прорізів

| Максимальний тиск вибуху, МПа | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2.5 | 5 | 7.5 | 10 | 12.5 | 20 | 30 |
| Кількість повністю розкритих ГПМ товщиною 4 мм, % | | | | | | |
| 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Кількість повністю розкритих ГПМ товщиною 6 мм, % | | | | | | |
| 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Кількість повністю розкритих ГПМ товщиною 8 мм, % | | | | | | |
| 93.3 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

*Джерело:* розроблено авторами

Результати розрахунку показали що у випадку використання ГПМ товщиною 4 мм та 6 мм всі ГПМ розкриваються. У випадку для ГПМ товщиною 8 мм для максимального надлишкового тиску 2.5 кПа розкриття не відбулося. Тобто застосування ГПМ товщиною 8 мм для приміщень з можливим надлишковим тиском вибуху до 2.5 кПа потребують додаткового обґрунтування за допомогою експерименту.

Отриману методику підбирання конструктивних параметрів секцій ЛСК на основі ГПМ можна використовувати як складову частину відомих методик розрахунку конструктивних параметрів ЛСК. За основу можна взяти методику, що наведена у роботах [18–21].

Зазначена загальна методика базується на виконанні таких процедур.

1. Визначається сумарна необхідна площа ЛСК.

2. Визначається коефіцієнт розкриття Кв конструкцій ЛСК за таблицею, в якій наведені усереднені величини коефіцієнтів для одинарного ГПМ різної товщини із різними розмірами прорізів, оскільки під час розрахунку ці коефіцієнти розрізняються несуттєво.

Після визначення коефіцієнта розкриття ЛСК має бути визначена необхідна площа ЛСК.

3. За методикою визначаються мінімальні розміри прорізу секції ЛСК a і b. За отриманими конструктивними параметрами визначається мінімальна кількість секцій ЛСК.

Таким чином, розроблена методика дає змогу розрахувати основні конструктивні параметри ЛСК на основі ГПМ із товщиною 4 мм, 6 мм та 8 мм.

**Висновки та напрями подальших досліджень.** За результатами проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. Для розроблення методики визначення розмірів прорізу ЛСК на основі ГПМ для їх гарантованого розкриття за умов досягнення критичного значення надлишкового тиску вибуху було запропоновано рівняння, у якому ці розміри є незалежними змінними.

2. За отриманим рівнянням було побудовано номограми для визначення геометричних розмірів прорізів ЛСК на основі ГПМ для їх гарантованого розкриття за умов досягнення критичного значення надлишкового тиску вибуху.

3. Для перевірки адекватності отриманих за допомогою розроблених номограм результатів було побудовано математичні моделі ГПМ у замках стандартного віконного профілю і проведено чисельний експеримент з їх використанням.

4. Унаслідок проведених чисельних експериментів доведено, що отримані за

номограмами та таблицями результати є адекватними, оскільки для всіх випадків максимального тиску розкриття відбувалося у 100% ГПМ, крім випадку ГПМ товщиною 8 мм для максимального надлишкового тиску вибуху 2.5 кПа.

5. Розроблена методика проєктування ЛСК на основі ГПМ з використанням запропонованих номограм та таблиць має просту реалізацію та економічні розрахункові алгоритми і дає змогу проєктувати ефективні ЛСК на основі ГПМ.

6. Із використанням розробленої методики проєктування систем легкоскидних конструкцій на основі гнучких полімерних матеріалів можна встановити залежність конструктивних параметрів систем ЛСК від надлишкового тиску вибуху.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ


1. Статистика пожеж та їх наслідків в Україні за 2013–2016 роки : статистичний збірник аналітичних матеріалів / за заг. ред. В. С. Кропивницького. Київ : УкрНДІЦЗ, 2018. 100 с.
2. СНиП 2.09.02 Производственные здания. М. : ЦНИИпромзданий ГОССТРОЙ СССР, 1991. 17 с.
3. Пособие по проектированию несущих и ограждающих конструкций промышленных зданий для взрывоопасных производств. М. : ЦНИИпромзданий, 1993. Актуализировано 01.01.2021.
4. ДСТУ Б В.1.1-36 : 2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. [Чинний з 2017-01-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2016. 31 с.
5. Расчет параметров легкосбрасываемых конструкций для взрывоопасных помещений промышленных объектов : рекомендации / Д. М. Гордиенко, А. Ю. Лагозин, А. В. Мордвинова, В. П. Некрасов, А. Н. Сычев. М. : ВНИИПО, 2015. 48 с.
6. ТКП 45-2.02-38-2006 (02250). Конструкции легкосбрасываемые. Правила расчета. Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2006. 27 с.
7. NFPA 68. Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting. 2013Edition. URL : https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=68 (last accessed : 10.05.2022).
8. BS EN 14491:2012. Dust Explosion Venting Protective Systems. URL : https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/73e55b45-f118-4aac-9678-c02d8374c1bf/en-14491-2012 (last accessed : 10.05.2022).
9. Підгорецький Ю. Ю. Дослідження надійності спрацьовування легкоскидних конструкцій із стільниковими полікарбонатними листами методом кінцевих елементів. *Міжвідомчий збірник наукових праць. Геотехнічна механіка*. Дніпро, 2020. Вип. 152. с. 107–115.
10. Ніжник В., Добряк Д., Підгорецький Ю. Дослідження розкриття прорізів легкоскидних конструкцій зі стільникових полікарбонатних листів під дією вибуху : наукове видання. *Надзвичайні ситуації : попередження та ліквідація : зб. наук. праць.* Черкаси : ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020. Т. 4. № 1. С. 55–61.
11. Pozdieiev S., Nizhnyk V., Pidhoretskiy Yu. Research of Disclosure of Relief Venting Structures with Polycarbonate Fencing in Conditions of Explosion. IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering. 2021. 1021. 012025. URL : https://iopscience.iop.org/issue/1757-899X/1021/1 (дата звернення : 10.05.2022).
12. Pidhoretskiy Yu. Research of the Actuation Reliability of Blast Relieve Systems with Honeycomb Polycarbonate Sheets. The Scientific Heritage. Hungary, Budapesht, 2020. Vol. 1. № 57(57). с. 45–50.
13. Pozdieiev S., Pidhoretskiy Yu., Nekora O., Sidnei S., Tyshchenko O. / Research of Explode Exposure at the Relief Vent System Structures with Soft Transparent Material. International Journal of Engineering & Technology. 2018. № 7(4.3). P. 298–302. URL : www.sciencepubco.com/index.php/IJET (дата звернення : 10.05.2022).
14. Поздєєв С. В., Підгорецький Ю. Ю., Некора О. В. Дослідження поведінки легкоскидних конструкцій на основі гнучких прозорих матеріалів в умовах вибуху. *V Міжнародна науково-технічна конференція «Технології та інфраструктура транспорту»* : тези доповідей (Харків, 14–16 трав. 2018 р.). Харків : УкрДУЗТ, 2018. С. 267
15. Пат. на корисну модель 112879 Україна, МПК(2016.01) E06B 3/00, E06B 5/12 (2006.01), C04B 26/18 (2006.01). Легкоскидна огороджуюча віконна конструкція / К. В. Потетня, заявник і патентовласник К. В. Потетня № u20161054316 ; заявл. 18.10.2016 ; опубл. 26.12.2016. Бюл. № 24. 2016.
16. Тимошенко С., Войновский-Кригер С. Пластины и оболочки. М. : Наука, 1966. с. 636.
17. Aagaard, B. T. Finite-Element Simulations of Earthquakes. PhD-Thesis, California Institute of Technology : Pasadena, California 2000.
18. Пилюгин Л. П. Обеспечение взрывоустойчивости зданий с помощью предохранительных конструкций. М. : Пожарная безопасность и наука, 2000. С. 224.
19. Пилюгин Л. П. Прогнозирование последствий внутренних аварийных взрывов. М. : Пожнаука, 2010. с. 380.
20. Пилюгин Л. П. Конструкции сооружений взрывоопасных производств. М. : Стройиздат, 1988. с. 315.
21. Орлов Г. Г. Легкосбрасываемые конструкции для взрывозащиты промышленных зданий. М. : Стройиздат, 1987. С. 198.


## REFERENCES


1. Statystyka pozhezh ta yikh naslidkiv v Ukraini za 2013-2016 roky. Statystychnyi zbirnyk analitychnykh materialiv. Za zahalnoiu redaktsiieiu V. S. Kropyvnytskoho. Kyiv : UkrNDNC, 2018. 100 s. [in Ukrainian].
2. SNyP 2.09.02 Proyzvodstvennыe zdanyia – M. : TsNYYpromzdanyi HOSSTROI SSSR, 1991. 17 s. [in russian].
3. Posobye po proektyrovanyiu nesushchykh y ohrazhdaiushchykh konstruktsyi promushlennukh zdanyi dlia vzruvoopasnukh proyzvodstv – M. : TsNYYpromzdanyi, 1993. Aktualyzyrovannui 01.01.2021. [in russian].
4. DSTU B V.1.1-36: 2016 Vyznachennia katehorii prymishchen, budynkiv ta zovnishnikh ustanovok za vybukhopozhezhnoiu ta pozhezhnoiu nebezpekoiu. [Chynnyi z 2017-01-01]. Vyd. ofits. Kyiv : Minrehion Ukrainy, 2016. – 31 s. [in Ukrainian].

5. Hordyenko, D. M., Lahozyn, A. Yu., Mordvynova, A. V., Nekrasov, V. P., Sычev, A. N. Raschet parametrov lehkosbrasыvaemыkh konstruktsyi dlia vzruvoopasnukh pomeshchenyi promыshlennыkh obъektov: rekomendatsyy. M.: VNYYPO, 2015. 48 s. [in russian].
6. TKP 45-2.02-38-2006 (02250). Konstruktsyy lehkosbrasuvamue. Pravyla rascheta. Mynsk : Mynysterstvo arkhytekturы y stroytelstva Respublyky Belarus, 2006. 27s. [in russian].
7. NFPA 68. Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting. 2013Edition [in English].
8. BS EN 14491:2012. Dust Explosion Venting Protective Systems. [in English].
9. Pidhoretskyi, Yu. Yu. Doslidzhennia nadiinosti spratsovuvannia lehkoskydnykh konstruktsii iz stilnykovymy polikarbonatnymy lystamy metodom kintsevykh elementiv. Mizhvidomchyi zbirnyk naukovykh prats. Heotekhnichna mekhanika. Dnipro, 2020. Vyp. 152. s. 107– 115. [in Ukrainian].
10. Nizhnyk, V., Dobriak, D., Pidhoretskyi, Yu. Doslidzhennia rozkryttia proriziv lehkoskydnykh konstruktsii zi stilnykovykh polikarbonatnykh lystiv pid diieiu vybukhu. Naukove vydannia. Nadzvychaini sytuatsii: poperedzhennia ta likvidatsiia: zb. nauk. prats. Cherkasy: ChIPB im. Heroiv Chornobylia NUTsZ Ukrainy, 2020. T. 4. № 1. S. 55–61. [in Ukrainian].
11. Pozdieiev, S., Nizhnyk, V., Pidhoretskiy, Yu. Research of Disclosure of Relief Venting Structures with Polycarbonate Fencing in Conditions of Explosion. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021. 1021. 012025. URL : https://iopscience.iop.org/issue/1757-899X/1021/1. [in Ukrainian].
12. Pidhoretskiy, Yu. Research of the Actuation Reliability of Blast Relieve Systems with Honeycomb Polycarbonate Sheets. The Scientific Heritage. Hungary, Budapesht. 2020. Vol. 1. № 57 (57). s. 45–50. [in Ukrainian].
13. Pozdieiev, S., Pidhoretskiy, Yu., Nekora, O., Sidnei, S., Tyshchenko, O. Research of Explode Exposure at the Relief Vent System Structures with Soft Transparent Material. International Journal of Engineering & Technology. 2018. № 7 (4.3). P. 298–302. URL : www.sciencepubco.com/index.php/IJET. [in English].
14. Pozdieiev, S. V., Pidhoretskyi Yu. Yu., Nekora O. V. Doslidzhennia povedinky lehkoskydnykh konstruktsii na osnovi hnuchkykh prozorykh materialiv v umovakh vybukhu. V Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia «Tekhnolohii ta infrastruktura transportu»: tezy dopovidei (Kharkiv, 14–16 travnia 2018 r.). Kharkiv : UkrDUZT, 2018. S. 267 [in Ukrainian].
15. Pat. na korysnu model 112879 Ukraina, MPK(2016.01) E06V 3/00, E06V 5/12 (2006.01), S04V 26/18 (2006.01). Lehkoskydna ohorodzhuiucha vikonna konstruktsiia / Potetnia K. V., zaiavnyk i patentovlasnyk Potetnia K. V. № u20161054316 ; zaiavl. 18.10.2016 ; opubl. 26.12.2016, Biul. № 24, 2016 r. [in Ukrainian].
16. Tymoshenko, S. P., Voinovskyi-Kryher, S. Plastynu y obolochky. M. : Nauka, 1966. s. 636. [in russian].
17. Aagaard, B.T. : Finite-Element Simulations of Earthquakes. PhD-Thesis, California Institute of Technology : Pasadena, California 2000. [in English].
18. Pyliuhyn, L.P. Obespechenye vzrыvoustoichyvosty zdanyi s pomoshchiu predokhranytelnыkh konstruktsyi. M. : 2000. M. : Assotsyatsyia «Pozharnaia bezopasnost y nauka», 2000. s. 224. [in russian].
19. Pyliuhyn, L.P. Prohnozyrovanye posledstvyi vnutrennykh avaryinыkh vzrыvov. M.: Pozhnauka, 2010. s. 380. [in russian].
20. Pyliuhyn, L.P. Konstruktsyy sooruzhenyi vzrыvoopasnыkh proyzvodstv. M. : Stroiyzdat, 1988. s. 315. [in russian].
21. Orlov, H.H. Lehkosbrasыvaemые konstruktsyy dlia vzrыvozashchytы promыshlennыkh zdanyi. M. : Stroiyzdat, 1987. s. 198. [in russian].


## DEVELOPMENT OF METHODS OF DESIGNING SYSTEMS OF EASY-DROPPED CONSTRUCTION ON THE BASIS OF FLEXIBLE POLYMERIC MATERIALS


*V. Nizhnyk, S. Pozdieiev , D. Dobriak, Yu. Pidhoretskiy, K. Potetnya, O. Krykun*

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

*[2]Cherkassy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine*

*[3]LLC «LIGHT DISCONSTRUCTION STRUCTURES», Ukraine*



KEYWORDS:

explosion; parameters of easy-dropped construction; reliability of opening; explosion overpressure critical value



ANNOTATION

The article highlights the topic of developing a method for determining the parameters of easy-dropped construction (hereinafter – EDC) on the basis of flexible polymeric materials (hereinafter – FPM) for their guaranteed opening under conditions of achieving a critical value of excess explosion pressure. The analysis of the current normative documents is carried out, as a result of which the requirements to the characteristics of EDC are determined, which are limited to the definition of the list of materials of their production, their area depending on the volume of the room and its category. Attention is drawn to the fact that in Ukraine in the field of fire rationing there are no recommendations for the calculation of EDC parameters, which determines the relevance of the developed methodology for designing and determining EDC parameters based on FPM. During the design of EDC on the basis of FPM the width and height of the openings of the window profile frames were determined as the main design parameters. The equilibrium equation is used for this purpose. The critical deflection is determined by the values of the critical displacements of the edges of the FPM in the mounting nodes. As a result of mathematical transformations, a formula for the critical deflection was obtained, taking into account the smallest slit size of the EDC. To develop a method for determining the size of the openings of EDC on the basis of FPM for their guaranteed opening under the critical value of the excess pressure of the explosion, an equation was proposed in which these dimensions are independent variables, nomograms were constructed to determine the geometric dimensions of EDC. Data on the parameters of the stress-strain state of the FPM and its displacement during the dynamic impact of the explosion were obtained. To verify the results obtained with the help of the developed nomograms, mathematical models of FPM in locks of standard window profile were built and numerical experiments with their use were conducted, which showed that the results obtained by nomograms are adequate, as for all cases EDC on the basis of FPM. The developed technique has a simple implementation and cost-effective calculation algorithms, which allows the design of effective EDC on the basis of FPM.

*УДК 614.841*

# ОБҐРУНТУВАННЯ ДОДАТКОВИХ ЗАХОДІВ ЩОДО ОПЕРАТИВНИХ ДІЙ ПІД ЧАС ГАСІННЯ ПОЖЕЖ НА СКЛАДАХ НАФТОПРОДУКТІВ В УМОВАХ БОЙОВИХ ДІЙ

*https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.1.72-79*

Одинець А. В.* ORCID iD 0000-0002-9562-8508
Ніжник В. В., ORCID iD 0000-0003-3370-9027
Сізіков О. О.,ORCID iD 0000-0002-7861-3144
Фещук Ю. Л. ORCID iD 0000-0003-4328-8473
Балло Я. В., ORCID iD 0000-0002-9044-1293
Климась Р. В. ORCID iD 0000-0001-8570-6392
Жихарєв О. П., ORCID iD 0000-0003-4323-1880
*E-mail:ndv4niipb@ukr.net

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

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

*Надійшла до редакції: 24.05.2022*
*Пройшла рецензування: 14.06.2022*

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

гасіння пожеж; оперативні дії підрозділів ДСНС; особливості обстановки; пожежі на складах нафти і нафтопродуктів в умовах ведення бойових дій

АНОТАЦІЯ

Проведено аналітичні дослідження чинних нормативно-правових актів, що регламентують вимоги до організації оперативних дій стосовно гасіння пожеж на складах нафти і нафтопродуктів. Виявлено необхідність їх удосконалення з урахуванням особливостей організації гасіння пожеж у районах постійних обстрілів та після них, можливої обстановки після обстрілу. Проаналізовано оперативні дії органів управління та пожежно-рятувальних підрозділів під час гасіння пожеж на території складів нафти і нафтопродуктів, що сталися внаслідок ракетно-артилерійських обстрілів російськими військами, щодо залучення підрозділів ДСНС до виконання завдань за призначенням з урахуванням максимального дотримання вимог нормативно-правових актів та заходів безпеки для учасників гасіння. Розглянуто додаткові заходи, які були вжиті під час організації гасіння пожеж внаслідок зовнішнього впливу бойових засобів ураження, а також визначено чинники, що ускладнювали їх ліквідацію в умовах динамічної зміни обстановки. Встановлено необхідність врахування під час гасіння пожеж на складах нафти і нафтопродуктів низки наявних або можливих додаткових потенційних загроз, пов'язаних з обстрілами або їх наслідками. Зокрема, таких як нестача тиску в мережі через ураження електричних і водонапірних мереж, пошкодження насосного обладнання, забруднення територій боєприпасами, відсутність обслуговуючого персоналу на об'єкті пожежі, можливість повторного обстрілу, одночасне пошкодження декількох резервуарів або всього складу нафтопродуктів, руйнування пожежних водойм та місць зберігання піноутворювача тощо. Визначено перелік додаткових заходів для кожного з етапів організації оперативних дій органів управління та пожежно-рятувальних підрозділів під час гасіння пожеж на території складів нафти та нафтопродуктів. Обґрунтовано необхідність розроблення методичних рекомендацій з урахуванням набутого практичного досвіду щодо організації оперативних дій підрозділів ДСНС під час гасіння пожеж на складах нафти і нафтопродуктів, що сталися внаслідок обстрілів в умовах ведення бойових дій.

**Постановка проблеми.** З початку повномасштабної російської військової агресії проти України ворог масово обстрілює склади зберігання нафтопродуктів як у районах ведення бойових дій, так і на решті території держави, з метою зниження обороноздатності та створення гуманітарної кризи у країні. Для завдання вогневого ураження ворог застосовує артилерійські системи, авіаційні засоби та балістичні ракети.

Зокрема, у період з 24 лютого по 1 квітня 2022 року на території Волинської, Житомирської, Київської, Луганської, Львівської, Миколаївської, Рівненської, Харківської, Хмельницької областей під час бойових дій виникла низка пожеж на складах нафти і нафтопродуктів, спричинених потраплянням артилерійських снарядів та ракет. За інформацією, наданою територіальними органами ДСНС, зареєстровано 14 таких пожеж, до гасіння яких було задіяно особовий склад підрозділів ДСНС, близько 450 осіб, та 85 одиниць техніки. Ліквідація окремих пожеж через постійні обстріли не проводилася з огляду на смертельну небезпеку для життя залучених осіб.

Так, наприклад, 7 березня російські війська обстріляли склади зберігання нафтопродуктів ТОВ «Грандтермінал» у місті Житомирі, спричинивши пожежу, ліквідація якої тривала більше 40 годин (до гасіння залучалося з особового складу 42 особи та 7 одиниць техніки), та ТОВ «Нафтотермінал» у смт Черняхів Житомирської області, ліквідація якої тривала близько 10 годин (до гасіння залучалося з особового складу 22 особи та 5 одиниць техніки). Внаслідок обстрілу 22 березня виникла пожежа на складі нафти та нафтопродуктів ПрАТ «ЛИНІК» у місті Лисичанську Луганської області, гасіння якої не здійснювалося через постійні обстріли [1].

Наведені вище пожежі виникали в результаті зовнішнього механічного впливу, а саме – через влучення в резервуари з паливом артилерійських снарядів, ракет тощо. Таким чином, спрогнозувати потенційні загрози, наслідки впливу на динаміку розвитку пожежі та руйнування, а відповідно і заходи для запобігання таким випадкам є неможливим.

Унаслідок вогневого ураження резервуарні парки складів нафтопродуктів зазнають руйнувань, виникають масштабні пожежі, територія об’єктів забруднюється вибухонебезпечними предметами. Крім того, існує загроза завдання повторних ударів.

За цих обставин органи управління та пожежно-рятувальні підрозділи ДСНС повинні забезпечувати реагування на всі випадки пожеж, здійснювати оперативні дії відповідно до нормативно-правових актів з обов’язковим урахуванням особливостей оперативної обстановки в конкретний час на місці надзвичайних подій із максимально можливим дотриманням заходів безпеки для особового складу підрозділів ДСНС.

Нині вимоги щодо організації гасіння пожеж на складах нафти і нафтопродуктів регламентуються документами [2–3] з урахуванням довідкових матеріалів [4]. В них передбачається організація дій за призначенням у мирний час, але не враховуються екстремальні особливості гасіння пожеж у разі активних воєнних дій.

З огляду на зазначене сьогодні актуальною задачею є обґрунтування додаткових заходів до оперативних дій пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС під час гасіння пожеж на складах нафти і нафтопродуктів, що сталися внаслідок артилерійських та ракетних обстрілів в умовах ведення бойових дій в Україні з урахуванням особливостей військового часу, які в подальшому слід викласти у відповідних методичних рекомендаціях для впровадження в практичну діяльність Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У процесі проведеного пошуку не виявлено джерел щодо досліджень організації оперативних дій під час гасіння складів нафти і нафтопродуктів

в умовах ведення бойових дій, окрім матеріалів опису гасіння таких пожеж, що сталися в Україні внаслідок обстрілів російськими військами у лютому – березні 2022 року.

**Формулювання цілей досліджень.** Метою цієї роботи є проведення аналізу кращих практик оперативних дій підрозділів ДСНС під час гасіння пожеж на складах нафтопродуктів, що сталися внаслідок обстрілів, та розроблення методичних рекомендацій про порядок гасіння пожеж в умовах ведення бойових дій.

Об'єктом досліджень є оперативні дії пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС під час гасіння пожеж на складах нафти і нафтопродуктів в умовах ведення бойових дій.

Предмет досліджень – вплив особливостей оперативної обстановки та динаміки розвитку пожежі після артилерійських та ракетних обстрілів складів нафти і нафтопродуктів на порядок дій пожежно-рятувальних підрозділів під час ліквідації таких пожеж.

Для досягнення поставленої мети необхідно провести аналіз нормативних документів, звітних матеріалів щодо виконання оперативних дій підрозділами ДСНС під час гасіння пожеж на складах нафти і нафтопродуктів, які сталися внаслідок обстрілів, і за результатами аналітичних досліджень розробити методичні рекомендації щодо організації оперативних дій підрозділів ДСНС під час гасіння пожеж на складах нафти і нафтопродуктів, що сталися внаслідок обстрілів в умовах ведення бойових дій з урахуванням вимог чинних нормативних документів та кращих практик гасіння таких пожеж.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Система організації та зміст дій органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту (далі – ОРС ЦЗ) під час гасіння пожеж в Україні регламентуються [2]. Оперативні дії під час гасіння пожеж – це організоване застосування сил і засобів пожежно-рятувальних підрозділів, спрямоване на рятування людей та гасіння пожеж. Вони передбачають: розвідку пожежі; рятування людей і евакуацію майна на пожежі; оперативне розгортання сил і засобів; гасіння пожежі; виконання спеціальних робіт; згортання сил і засобів; повернення до місця постійної дислокації.

У документі [2] визначено загальні задачі під час організації оперативних дій на пожежі та їх особливості під час гасіння пожеж на об'єктах різного функціонального призначення, зокрема і в резервуарних парках для зберігання легкозаймистих та горючих рідин (далі – ЛЗР (ГР)) та зріджених вуглеводнів, з урахуванням їх оперативно-тактичної характеристики та умов розвитку пожежі (погодні умови, температурний режим, відсутність протипожежного водопостачання, конструктивні особливості, наявність небезпечних речовин тощо).

З огляду на те, що пожежі складів нафти і нафтопродуктів здебільшого характеризуються швидким поширенням, складними процесами розвитку і ліквідовуються зі значними труднощами, дії щодо їх гасіння у резервуарах з нафтою і нафтопродуктами детально визначено у [3]. Згідно з цим нормативним актом передбачено загальні вимоги щодо гасіння пожеж у резервуарах, організацію роботи оперативного штабу на пожежі, нормативні інтенсивності подавання пінних засобів та інших вогнегасних речовин, охолодження резервуарів, підготовку і проведення пінної атаки, тактику гасіння пожеж з урахуванням обставин, які ускладнюють процес гасіння (утворення зон, до яких не можна подати піну, прогрівання рідини з утворенням гомотермічного шару більше 1 м, низька температура навколишнього середовища, одночасне горіння двох і більше резервуарів, одночасне горіння резервуара та нафтопродукту в обвалуванні), заходи безпеки та організаційно-підготовчі заходи щодо розроблення планів пожежогасіння,

підготовки особового складу, взаємодії зі службами об'єкта та населеного пункту.

Також у [3] містяться довідкові матеріали, зокрема щодо основних характеристик піноутворювачів, класифікації резервуарів, методика розрахунку сил і засобів для гасіння пожеж у резервуарах тощо, які впливають на тактику пожежогасіння.

Крім того, довідкові матеріали з питань організації гасіння пожеж на складах нафти і нафтопродуктів наведено у [4]. Визначено кількість водяних стволів для охолодження резервуара, що горить (залежно від його геометричних параметрів), та сусіднього; кількість генераторів піни для гасіння за видом палива у резервуарі; лінійну швидкість вигоряння та прогрівання за видом нафтопродуктів; розрахунковий час гасіння нафтопродуктів за видом та засобами подавання піни. Зазначене суттєво впливає на скорочення часу, необхідного для ухвалення рішень під час гасіння пожеж на складах нафти і нафтопродуктів. Водночас зазначені вище керівні документи та довідкові матеріали розроблялися у мирний час та не могли враховувати особливості організації оперативних дій підрозділів ДСНС під час гасіння пожеж в умовах військової агресії.

Таким чином, перед підрозділами ДСНС постало питання, як саме здійснювати оперативні дії з гасіння пожеж в умовах ведення бойових дій, зберігаючи від ураження особовий склад, ухвалювати рішення щодо гасіння або не гасіння таких пожеж, не порушуючи вимоги чинних керівних документів з цього питання.

Порядок виконання органами управління та підрозділами Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту завдань за призначенням в особливих умовах, зокрема у населених пунктах і територіях, що потрапляють у зону постійних обстрілів під час збройного конфлікту, визначено у [5], в якому передбачаються загальні заходи для всіх етапів організації оперативних дій.

Так, під час організації заходів з оперативного реагування на пожежі в умовах бойових дій органи управління та керівний склад підрозділів ДСНС здійснюють постійний обмін інформацією з підрозділами Збройних Сил України, у тому числі територіальної оборони, правоохоронними органами, військовими адміністраціями та місцевими органами влади у визначених зонах відповідальності з питань підконтрольності населених пунктів і територій; загальної ситуації в населених пунктах і територіях; уточнення районів (місць) ведення постійних обстрілів та види озброєння, що ймовірно можуть бути застосовані (ракети, авіаційні та артилерійські засоби ураження, стрілецька зброя, мінування території); можливості залучення підрозділів ДСНС до виконання завдань за призначенням у населених пунктах і на територіях; уточнення безпечних маршрутів (основний і запасний) пересування підрозділів ДСНС до районів (місць) виконання завдань за призначенням; взаємодії підрозділів ДСНС з підрозділами Збройних Сил України, у тому числі територіальної оборони, з правоохоронними органами, військовими адміністраціями та місцевими органами влади під час реагування, зокрема на пожежі, та проведення інших невідкладних робіт із дотриманням особовим складом заходів безпеки та урахуванням ситуації, що склалася на місці події. Разом із тим у [5] не міститься інформація щодо особливостей організації оперативних дій під час гасіння пожеж на складах нафти і нафтопродуктів після ракетно-артилерійських обстрілів.

Результати аналізу звітних матеріалів щодо виконання оперативних дій підрозділами ДСНС під час гасіння пожеж на складах нафти і нафтопродуктів унаслідок ракетно-артилерійських обстрілів свідчать, що рішення щодо залучення підрозділів ДСНС для гасіння таких пожеж ухвалювалося після надання інформації щодо оперативної обстановки підрозділами Збройних Сил України, правоохоронними органами, підрозділами

територіальної оборони та місцевими органами виконавчої влади й уточнення інформації щодо можливих повторних обстрілів і з'ясування безпечних маршрутів руху пожежно-рятувальних підрозділів до місця події.

Зокрема, враховуючи розвиток ситуації та небезпеку для особового складу, першочергово, для проведення розвідки, до місця пожежі скерували чергову зміну оперативно-координаційного центру або один оперативний розрахунок на автоцистерні, після чого ухвалили рішення щодо висування основних сил і засобів для гасіння. З метою мінімізації можливого ураження пожежно-рятувальної техніки та особового складу на шляху прямування між автомобілями дотримувалися безпечної дистанції – не менше ніж 100 метрів.

Із прибуттям підрозділів до місця події керівники гасіння пожеж проводили розвідку пожежі, встановлювали на місці проведення робіт наявність вибухонебезпечних предметів, що могли залишитися після обстрілів, визначали можливі укриття для особового складу на випадок повторних обстрілів.

Для управління силами і засобами утворювалися штаби на пожежі, необхідна кількість оперативних дільниць для охолодження резервуарів, гасіння нафтопродуктів у резервуарах та розлитих в обвалуванні, здійснювався постійний моніторинг обстановки на місці пожежі, контроль загрози повторних обстрілів, вживалися заходи щодо недопущення травмування особового складу, в тому числі від вибухонебезпечних уламків боєприпасів, що могли залишитися після обстрілів.

Основні зусилля пожежно-рятувальних підрозділів зосереджувалися на недопущенні подальшого неконтрольованого зростання площі пожежі та перекидання вогню на вцілілі резервуари шляхом інтенсивного їх охолодження та зниження інтенсивності горіння розлитих нафтопродуктів через подавання повітряно-механічної піни. Для локалізації розливів нафтопродуктів облаштовувалися штучні бар'єри, зокрема з використанням мішків із піском.

У разі загрози повторних обстрілів оперативні дії припинялися, особовий склад і техніка організовано відводилися в безпечне місце або ухвалювалося рішення про повернення до пунктів постійної дислокації.

У деяких випадках гасіння пожеж не проводилося через постійні обстріли та смертельну загрозу для особового складу.

За результатами проведених аналітичних досліджень [2–5], аналізу звітних матеріалів щодо виконання оперативних дій підрозділами ДСНС під час гасіння пожеж на складах нафти і нафтопродуктів унаслідок ракетно-артилерійських обстрілів було визначено особливості їх організації за різних обставин в умовах ведення бойових дій, що не зазначені у цих документах: затримка виїзду сил і засобів ДСНС через обстріли території складу нафтопродуктів, можливість тимчасового призупинення оперативних дій під час гасіння пожежі для відведення й укриття особового складу внаслідок загрози обстрілу, брак тиску в мережі протипожежного водопроводу внаслідок ураження електричних і водопровідних мереж, забруднення території боєприпасами, що не вибухнули тощо.

З огляду на викладене вище автори роботи рекомендували такий порядок організації оперативних дій для підрозділів ДСНС під час гасіння пожеж на складах нафти і нафтопродуктів, що сталися внаслідок ракетно-артилерійських обстрілів.

Вирішальним (з урахуванням вимог [2]) напрямком оперативних дій на пожежі, що виникла на складах нафти і нафтопродуктів внаслідок ракетно-артилерійського обстрілу, слід вважати такий, на якому утворилася небезпека для людей, загроза вибуху, руйнування конструкцій, найбільш інтенсивне поширення вогню на поряд розташовані групи резервуарів, будівлі, споруди та на якому оперативні дії пожежно-рятувальних

підрозділів ДСНС у цей час можуть забезпечити успіх гасіння або локалізації пожежі [2].

Сили і засоби ДСНС у першочерговому порядку вводяться на вирішальному напрямку оперативних дій з урахуванням обстановки та загрози повторного обстрілу району розташування об'єкта.

У разі горіння нафтопродуктів у межах обвалування внаслідок масового руйнування резервуарів за недостатності сил і засобів слід основні зусилля пожежно-рятувальних підрозділів спрямовувати на захист сусідніх уцілілих резервуарів, що не горять.

Для захисту вцілілих резервуарів, що не горять, слід подавати потужні струмені води для їх охолодження та задіяти за наявності стаціонарні системи зрошування. Водночас варто забезпечити контрольоване вигоряння розлитих нафтопродуктів зі зруйнованих резервуарів у межах обвалування через подавання вогнегасних речовин з боку сусідніх уцілілих резервуарів для зменшення інтенсивності горіння і, як наслідок, зменшення теплового впливу на них.

У разі руйнування обвалування резервуара (групи резервуарів) та розтікання нафтопродуктів, що горять, за його межі необхідно організувати облаштування додаткових обвалувань та спрямовувальних валів для локалізації поширення розливу чи відведення його у безпечне місце.

Для виконання зазначених інженерних робіт слід задіяти об'єктові сили і засоби та відповідні формування цивільного захисту.

Основні зусилля пожежно-рятувальних підрозділів слід зосередити як на захисті непошкоджених резервуарів, що не горять, так і на захисті сил та засобів, задіяних до проведення інженерних робіт з облаштування додаткових обвалувань та спрямовувальних валів.

У цьому випадку локалізувати пожежу зазвичай можливо через забезпечення контрольованого вигоряння розлитих нафтопродуктів за допомоги подавання вогнегасних речовин з боку сусідніх уцілілих резервуарів.

У разі наявності достатньої кількості сил і засобів та впевненості у досягненні результатів оперативних дій слід підготувати та провести пінну атаку для гасіння нафтопродуктів в обвалуванні, а також у незруйнованих резервуарах, що горять.

Якщо на під'їзних коліях та зливно-наливних естакадах складу нафтопродуктів знаходяться залізничні цистерни, необхідно організувати їх відведення за допомогою маневрових локомотивів у безпечне місце за межами зони ураження.

У випадку горіння залізничних цистерн (після їх виведення з території складу) необхідно організувати їх розчеплення та відведення у безпечне місце тих, що не горять.

Для локалізації місць розливу нафтопродуктів необхідно організувати їх обвалування та облаштування спрямовувальних валів для відведення розлитих нафтопродуктів у безпечне місце.

За наявності достатньої кількості сил і засобів організовується гасіння цистерн та розливу нафтопродуктів. У разі недостатньої кількості сил і засобів основні зусилля зосереджуються на забезпеченні контрольованого вигоряння нафтопродуктів.

Якщо за результатом оцінки параметрів пожежі виявлено недостатню кількість сил та засобів для її ліквідації, слід повідомити про це оперативно-координаційний центр (пункт зв'язку підрозділу) ДСНС та організувати безпечну локалізацію пожежі (охолодження резервуара, що горить, і суміжних із ним) без організації пінної атаки, а також:

- вжити заходів щодо евакуації адміністративного персоналу та персоналу, який не може бути залучений до ліквідації пожежі, до безпечного місця;
- вжити заходів щодо припинення будь-яких технологічних операцій з паливом для зменшення ризиків

виникнення додаткових аварійних ситуацій;

- розглянути можливість організації створення додаткового обвалування території, створення штучного бар'єра (мішків із піском) або організації інших можливих заходів, які спрямовані на обмеження поширення пожежі за межі резервуарного парку спільно із технічним персоналом та можливістю залучення їх робочої техніки;

- розглянути можливість із технічним персоналом нафтобази здійснення аварійного зливання палива в інші безпечні ємності, відкачування ЛЗР (ГР) із резервуарів і заповнення їх водою чи парою, організувати відведення мобільної техніки (бензовозів, залізничних цистерн тощо) за межі небезпечної зони нафтобази.

Під час обстрілу або загрози повторних ракетно-артилерійських обстрілів району розташування об'єкта, якщо існує небезпека особовому складу, оперативні дії з гасіння пожеж на складах нафтопродуктів не проводяться. Особовий склад і техніка відводяться у безпечне місце. Відновлення оперативних дій здійснюється після припинення або мінімізації загрози для особового складу.

**Висновки та напрями подальших досліджень.** Під час гасіння пожеж на складах нафти та нафтопродуктів, що сталися внаслідок зовнішнього впливу бойових засобів ураження, необхідно враховувати ряд додаткових чинників, а саме:

- можливість повторних обстрілів сусідніх резервуарів з нафтопродуктами та місць дислокації сил і засобів ДСНС;

- можливість одночасного пошкодження та горіння декількох резервуарів, у тому числі розосереджених, або всього складу нафтопродуктів;

- затримка виїзду сил і засобів ДСНС у зв'язку із обстрілами території складу нафтопродуктів;

- можливість тимчасового призупинення оперативних дій під час гасіння пожежі для відведення та укриття особового складу внаслідок загрози обстрілу;

- нестача тиску в мережі протипожежного водопроводу через ураження електричних і водопровідних мереж, пошкодження насосного обладнання;

- можливе руйнування пожежних водойм і резервуарів із запасом води для пожежогасіння та місць зберігання запасу піноутворювача;

- забруднення території боєприпасами, що не вибухнули, та їх вибухонебезпечними уламками;

- можлива відсутність обслуговуючого персоналу на складах нафтопродуктів через загрозу обстрілу або їх укриття у захисних спорудах.

За результатами проведених аналітичних досліджень з урахуванням практичного досвіду пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС під час гасіння пожеж на складах нафти і нафтопродуктів унаслідок ракетно-артилерійських обстрілів в умовах ведення бойових дій ІДУ НД ЦЗ спільно з ДСНС розробили відповідні Методичні рекомендації [6] для подальшого впровадження в практичну діяльність Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ніжник В. В., Климась Р. В., Одинець А. В. Гасіння пожеж на складах нафти та нафтопродуктів в умовах ведення бойових дій : зб. матер. доп. учасн. *XIII Міжнар. наук.-практ. конф*. Черкаси : ЧІПБ, 2022. С. 30–32.
2. Про затвердження Статуту дій органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту під час гасіння пожеж: наказ МВС України від 26.04.2018 р. № 340. *Офіційний вісник України.* 2018. № 57. Ст. 2000.
3. Про затвердження Інструкції щодо гасіння пожеж у резервуарах із нафтою та нафтопродуктами : наказ МНС України від 16.02.2004 р. № 75 (НАПБ 05.035-2004). URL : https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files (дата звернення : 10.05.2022).
4. Довідник керівника гасіння пожежі / за заг. ред. В. С. Кропивницького. Київ : Літера-друк, 2016. 320 с.
5. Про затвердження Статуту дій у надзвичайних ситуаціях органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту : наказ МВС України від 26.04.2018 р. № 340. *Офіційний вісник України*. 2018. № 57. Ст. 2000.

6. Методичні рекомендації щодо організації оперативних дій підрозділів ДСНС під час гасіння пожеж на складах нафтопродуктів, що сталися внаслідок обстрілів в умовах ведення бойових дій : методичні рекомендації; за окремим дорученням ДСНС від 31.05.2022 р. № В-269. С. 15.

**REFERENCES**

1. Nizhnyk, V. V., Klymas, R. V., Odynets, A. V. Hasinnia pozhezh na skladakh nafty ta naftoproduktiv v umovakh vedennia boiovykh dii: zb. materialiv dop. uchasn. XIII Mizhnar. nauk.-prakt. konf. Cherkasy : ChIPB, 2022. S. 30–32. [In Ukrainian].
2. Statut dii orhaniv upravlinnia ta pidrozdiliv Operatyvno-riatuvalnoi sluzhby tsyvilnoho zakhystu pid chas hasinnia pozhezh: zatv. nakazom Min-va vnutrishnikh sprav Ukrainy vid 26.04.2018 № 340 // zareiestrovano v Ministerstvi yustytsii Ukrainy 10 lypnia 2018 r. za № 802/32254. Ofitsiinyi visnyk Ukrainy, 2018. № 57. St. 2000. [In Ukrainian].
3. Instruktsiia shchodo hasinnia pozhezh u rezervuarakh iz naftoiu ta naftoproduktamy : zatverdzhena nakazom MNS Ukrainy vid 16.02.2004 № 75 (NAPB 05.035-2004) [In Ukrainian].
4. Dovidnyk kerivnyka hasinnia pozhezhi/za zah. red. V. S. Kropyvnytskoho. Kyiv : TOV «Litera-druk», 2016. 320 s. [In Ukrainian].
5. Statut dii u nadzvychainykh sytuatsiiakh orhaniv upravlinnia ta pidrozdiliv Operatyvno-riatuvalnoi sluzhby tsyvilnoho zakhystu : zatv. nakazom Min-va vnutrishnikh sprav Ukrainy vid 26.04.2018 № 340 // zareiestrovano v Ministerstvi yustytsii Ukrainy 10 lypnia 2018 r. za № 802/32253. Ofitsiinyi visnyk Ukrainy, 2018. № 57. St. 2000 [In Ukrainian].

# JUSTIFICATION OF ADDITIONAL MEASURES FOR OPERATIONAL ACTIONS DURING FIRE EXTINGUISHING IN PETROLEUM PRODUCTS WAREHOUSES IN CONDITIONS OF COMBAT

*A. Odinets, V. Nizhnyk, O. Sizikov, Yu. Feshchuk, Ya. Ballo, R. Klymas, O. Zhikharev*

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

KEYWORDS:

firefighting; operational actions of SESU peculiarities of the situation; fires in oil and oil products warehouses in the conditions of hostilities

ANNOTATION

Analytical studies of current regulations governing the organization of operational actions for firefighting in oil and oil depots and the need to improve them, taking into account the peculiarities of firefighting in areas of constant shelling and after them, the possible situation after the shelling. An analysis of the operational actions of government agencies and fire and rescue units during firefighting in oil depots and oil products caused by rocket and artillery shelling by Russian troops on the involvement of SESU in the assigned tasks, taking into account maximum compliance with regulatory requirements. acts and safety measures for firefighters. Additional measures taken during the organization of firefighting due to external influences of weapons are analyzed, as well as identified factors that complicate the suppression of such fires in a dynamic change of circumstances. The need to take into account when extinguishing fires in oil and oil products a number of existing or possible additional potential threats related to shelling or their consequences, such as lack of pressure in the network due to damage to electrical and water networks, damage to pumping equipment, contamination of munitions , lack of maintenance personnel at the fire site, the possibility of re-firing, simultaneous damage to several tanks or the entire composition of petroleum products, the destruction of fire reservoirs and storage areas of the foaming agent, etc. The list of additional measures for each of the stages of organization of operational actions of management bodies and fire and rescue units during firefighting on the territory of oil and oil products warehouses is determined. The necessity of development of methodical recommendations taking into account the gained practical experience on the organization of operative actions of SESU during fire extinguishing in warehouses of oil and oil products which have occurred as a result of attacks in the conditions of conducting combat operations is substantiated.

*УДК 614.841*

# ТЕХНОЛОГІЯ ВОГНЕЗАХИСТУ ДЕРЕВИНИ ПОКРИТТЯМИ НА ОСНОВІ МОДИФІКОВАНИХ ЕПОКСІАМІННИХ КОМПОЗИЦІЙ

*https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.1.80-87*

Пархоменко В.-П. О. ORCID iD 0000-0001-7431-4801
Борисяк П. Б.
Лавренюк О. І.* ORCID iD 0000-0003-4509-2896
Михалічко Б. М. ORCID iD 0000-0002-5583-9992
*E-mail: olaw@ukr.net

*Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна*

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ
*Надійшла до редакції: 02.06.2022*
*Пройшла рецензування: 13.06.2022*

КЛЮЧОВІ СЛОВА:
епоксіамінні композиції; купрум(II) гексафлуорсилікат; деревина деревина; вогнезахисні покриття; вогнезахисна ефективність

АНОТАЦІЯ
Наведено результати розроблення технології отримання і нанесення вогнезахисного покриття для деревини на основі епоксіамінних композицій, модифікованих CuSiF6, та здійснена оцінка його вогнезахисної ефективності. Встановлено, що модифікування епоксіамінних композицій купрум(II) гексафлуорсилікатом призводить до підвищення температур займання та самозаймання на 28ºС та 52ºС відповідно, стрімкого зниження показників групи горючості та переводить їх з групи горючих матеріалів середньої займистості в групу важкогорючих. Завдяки введенню антипірену в епоксіамінну композицію суттєво знижується коефіцієнт димоутворення в режимі горіння та тління, що гарантує можливість отримання матеріалів з помірною димоутворювальною здатністю. Експериментальне дослідження особливостей поширення полум'я поверхнею зразків епоксиполімерних матеріалів засвідчило, що купрумвмісні композиції не поширюють полум'я і належать до найвищої категорії стійкості до горіння V-0. Отримані покриття на основі модифікованих композицій за вогнезахисною ефективністю належать до І групи.

**Постановка проблеми.** Поєднання високих фізико-механічних та експлуатаційних властивостей зумовлює широке використання деревини як будівельного матеріалу. Проте цей матеріал горючий та повністю знищується вогнем за короткий проміжок часу. Для підвищення пожежної безпеки деревини, унеможливлення її займання від джерел запалювання низької потужності, зниження швидкості поширення полум'я поверхнею деревини, запобігання поширенню полум'я по поверхні дерев'яних конструкцій на різних етапах пожежі проводять вогнезахисну обробку [1–2].

З метою підвищення вогнестійкості деревини використовують лаки, фарби, штукатурки, обмазки, плівкові покриття, вогнестійкі панелі, листи, плити тощо [3– 5]. Втім, найпоширенішими є вогнезахисні просочення та вогнезахисні покриття на основі органічних зв'язувальних. Поверхневе просочення – це дуже простий спосіб вогнезахисту деревини, однак недостатньо ефективний. Просочувальні вогнезахисні речовини з часом легко вимиваються з поверхні деревини, не стійкі до атмосферних впливів і можуть застосовуватися лише в приміщеннях, вологість в яких не перевищує 70%. Більш ефективним є

глибоке просочення, але високий ступінь вогнезахисту досягається лише за умови значного поглинання антипіренів. Це значно ускладнює технологічний процес вогнезахисту та негативно відображається на властивостях деревини, наприклад, збільшується її маса, крихкість та гігроскопічність.

Нанесення вогнезахисних покриттів гарантує отримання важкозаймистої або важкорючої деревини. Механізм дії вогнезахисних покриттів полягає в зміні процесу розкладу целюлозного матеріалу в твердій фазі та запобіганні окисненню продуктів розкладу в газовій фазі. Це дає змогу підвищити вогнестійкість дерев'яних конструкцій до декількох годин [6–7]. З огляду на зазначене дослідження, спрямовані на розроблення нових ефективних рецептур вогнезахисних покриттів для деревини, які б задовольняли сучасні вимоги, є вкрай актуальними.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Покриття, які використовують для вогнезахисту деревини, є багатокомпонентними системами, до складу яких входять зв'язувальне, затвердник та антипірен. Як зв'язувальне найчастіше використовують полімери, які здатні вступати в реакції конденсації, зшивання, циклізації, а в процесі їх розкладу утворюються нелеткі карбонізовані продукти. Зважаючи на сукупність адгезійно-міцнісних, технологічних та захисних властивостей, одними з найефективніших є зв'язувальні на основі епоксидних смол. Використання полімерних композицій на основі епоксидних смол для вогнезахисної обробки деревини можливе лише за умови введення антипіренів.

Огляд сучасних світових тенденцій ринку антипіренів свідчить про виняткову перспективність солей перехідних металів [8–9]. Унаслідок незавершеності внутрішніх електронних оболонок перехідні метали схильні до комплексоутворення. Автори робіт досліджували процеси комплексоутворення в системі сіль купруму(II): купрум(II) сульфат, купрум(II) карбонат, купрум(II) гексафлуорсилікат – амінний затвердник епоксидних смол поліетиленполіамін (*repa*). Встановлено, що внаслідок хімічної взаємодії між сіллю купруму та аміном-затвердником, яка супроводжується появою міцних зв'язків типу Cu–N, утворюються хелатні комплекси. Надалі вони були використані як антипірени-затвердники епоксидних композицій.

Введення солей купруму в епоксіамінні композиції призводить не лише до підвищення їх термостійкості, а й до зниження температури завершення процесу згоряння композиції. Модифіковані композиції порівняно з немодифікованими менш схильні до займання, що відображається в значно вищих показниках температур займання та самозаймання. Ба більше, купрумвмісні композиції взагалі не спроможні займатися від джерел запалювання невисокої потужності, тобто належать до важкогорючих матеріалів. Композиції, які містять згадані антипірени, характеризуються значно нижчим димовиділенням та швидкістю поширення полум'я стосовно композицій без додавання солі *d*-металу. Показово, що завдяки винятковій схильності до комплексоутворення згадані солі купруму(II) спроможні вбудовуватися в структуру полімеру, що гарантує збереження на належному рівні експлуатаційних характеристик матеріалів на основі епоксіамінних композицій [10– 11].

**Формулювання цілей досліджень.** Розроблення технології отримання і нанесення вогнезахисного покриття для деревини на основі епоксіамінних композицій, модифікованих $CuSiF_6$, та оцінка його вогнезахисної ефективності.

**Методи дослідження.** Для отриманих матеріалів на основі епоксіамінних композицій визначали температуру займання та самозаймання відповідно до ДСТУ 8829:2019 (п. 7.8, п. 7.10). Для досліджень готували 10 зразків

циліндричної форми масою 3 г. Групу горючості оцінювали згідно з ДСТУ 8829:2019 (п. 7.3). Випробуванням піддавали зразки розміром 150×60×5 мм. Під час визначення коефіцієнта димоутворення керувались ДСТУ 8829:2019 (п. 7.19), розміри зразків становили 40×40 мм. Швидкість поширення полум'я по поверхні зразків визначали за UL94, використовуючи зразки розміром 125×10×5 мм. Усі підготовлені зразки перед дослідженнями витримували у сушильній шафі за температури 60ºС впродовж 20 год. Оцінку вогнезахисної ефективності засобів захисту деревини, яка полягає у визначенні втрати маси деревини, обробленої досліджуваним покриттям під час вогневого випробування в умовах, які сприяють акумуляції тепла, проводили згідно з ГОСТ 16363-98.

**Виклад основного матеріалу**. Зважаючи на результати попередньо проведених експериментальних досліджень щодо впливу вмісту купрум(II) гексафлуорсилікату (11, 22, 44, 66, 88 мас. ч.) в епоксіамінних композиціях на параметри пожежної небезпеки матеріалів на їх основі [12–13], була проведена оптимізація компонентного складу епоксіамінної композиції, відпрацьована технологія отримання такої оптимізованої композиції, а також була розроблена технологія нанесення вогнезахисного покриття на деревину. Для отримання композиції використовували епоксидіанову смолу ЕД- 20, поліетиленполіамін та купрум(II) гексафлуорсилікат. На першому етапі досліджень отримували антипірен-затвердник епоксидних композицій за методикою, детально описаною в роботі [14]. Приготований антипірен-затвердник у співвідношенні ЕД- 20:*рера*:$CuSiF_6$ = 100:12:55 мас.ч. вводили в епоксидний олігомер та перемішували впродовж 5-10 хв до отримання однорідної маси. Паралельно готували так звану вихідну композицію без антипірену через змішування епоксидної смоли із затвердником у співвідношенні ЕД-20:*рера* = 100:12 мас.ч. Готові композиції заливали у форми і витримували за кімнатної температури впродовж 24 год до повного затвердніння.

Для нанесення вогнезахисного покриття використовували зразки сосни у вигляді бруска розміром 150×60×30 мм. Перед нанесенням вогнезахисного засобу зразки витримували в термостаті за температури (45±2)ºС до досягнення постійної маси. Покриття наносили двома шарами, загальна витрата вогнезахисного засобу становила в середньому 100– 150 г/м$^2$. Після нанесення покриття зразки витримували за кімнатної температури впродовж доби до повного затвердіння покриття.

Важливим аспектом під час розроблення полімерних композицій для вогнезахисної обробки деревини є визначення їх схильності до займання. Як засвідчили результати проведених досліджень (табл. 1), у разі додавання антипірену температури займання та самозаймання композиції порівняно з вихідною композицією підвищуються на 28ºС та 52ºС відповідно. Як відомо, вирішальну роль під час виникнення процесів займання та самозаймання відіграє інтенсивність розкладу твердого матеріалу та виділення летких горючих продуктів, утворення горючої газоповітряної суміші та перебіг реакції окиснення. Чим нижча швидкість цих процесів, тим вищими будуть значення температур займання та самозаймання.

*Таблиця 1* – Результати експериментального визначення температур займання та самозаймання епоксіамінних композицій

| Показник | Композиція | |
|---|---|---|
| | ЕД/*рера* | ЕД/*рера*-$CuSiF_6$ |
| Температура займання, ºС | 325 | 353 |
| Температура самозаймання, ºС | 530 | 582 |

*Джерело:* розроблено авторами

Введення антипірену $CuSiF_6$ в епоксидну композицію призводить до

перебігу хімічної взаємодії між самим антипіреном та горючим затвердником *epepa*, що супроводжується утворенням міцних координаційних зв'язків. Руйнування цих зв'язків потребує затрат додаткової енергії, тому швидкість розкладу таких композицій знижується, а температури займання та самозаймання зростають. Важливо, що в умовах горіння $CuSiF_6$ може розкладатися з виділенням негорючих купрум фториду та силіцій фториду. Це зумовить зміну співвідношення продуктів деструкції на користь негорючих газів.

Ефективність дії запропонованого антипірену відображається і на результатах визначення параметрів, за якими оцінюють групу горючості (табл. 2).

*Таблиця 2* – Результати експериментального визначення показників групи горючості епоксіамінних композицій

| Показник | Композиція | |
|---|---|---|
| | ЕД/*epepa* | ЕД/*epepa*-$CuSiF_6$ |
| Температура реакційної камери до введення зразка, $t_o$, ºС | 200 | 200 |
| Максимальна температура газоподібних продуктів згоряння, $t_{max}$, ºС | 867 | 228 |
| Максимальний приріст температури, $\Delta t_{max}$, ºС | 667 | 28 |
| Тривалість досягнення максимальної температури, $\tau$, с | 150 | 283 |
| Втрата маси, $\Delta m$, % | 89,0 | 5,2 |
| Група горючості | горючі, середньої займистості | важкогорючі |

*Джерело:* розроблено авторами

Так, композиції, які не містять антипірену, мають доволі високі значення максимальної температури газоподібних продуктів горіння ($t_{max}$ = 867ºС) та втрати маси під час горіння ($\Delta m$ = 89,0%), що дає змогу віднести їх до горючих матеріалів. За тривалістю досягнення максимальної температури такі композиції класифікують як матеріали середньої займистості.

У разі додавання антипірену спостерігається стрімке зниження показників групи горючості. Максимальний приріст температури для зразків таких композицій не перевищує 60ºС, а втрата маси під час горіння менша 60%, тому вони належать до важкогорючих матеріалів.

Візуальне спостереження за перебігом самого процесу горіння показало, що зразки композиції без антипірену дуже легко й швидко займаються, горять з виділенням надзвичайно великої кількості диму і сажі та важко піддаються гасінню. Натомість зразки композиції, які містять антипірен, горять лише у разі дії полум'я пальника і моментально припиняють горіти після його видалення.

Отримані дані добре корелюють з результатами визначення швидкості поширення полум'я. Внаслідок дії полум'я пальника зразок вихідної композиції легко займався та продовжував самостійно горіти після видалення пальника аж до моменту вимушеного гасіння. Оскільки розрахована швидкість горіння становила 25,2 мм/хв, то згідно з UL94 такий матеріал належить до категорії HB (полум'я пальника є джерелом займання горизонтально закріпленого зразка). Горіння зразків такої композиції супроводжувалося падінням палаючих продуктів розкладу, що зумовлювало займання вати, підкладеної під зразок. Під час виникнення пожежі такий процес може стати причиною появи нових

осередків займання, що неминуче призведе до збільшення загальної площі, охопленої полум'ям.

*Таблиця 3* – Результати експериментального визначення швидкості поширення полум'я по зразкам епоксіамінних композицій

| Показник | Композиція | |
|---|---|---|
| | ЕД/*рера* | ЕД/*рера*-$CuSiF_6$ |
| Середня швидкість горіння, *v*, мм/хв | 25,2 | зразок згасає після видалення полум'я |
| Тривалість самостійного горіння, τ, с | горять до моменту вимушеного гасіння | 0 |
| Сумарний час горіння зразка, с | – | 8 |
| Сумарний час горіння серії із п'яти зразків, с | – | 43 |
| Тривалість горіння і тління зразка після другого піднесення полум'я, с | – | 12 |
| Кількість зразків, які прогоріли до затискача | – | 0 |
| Наявність палаючих крапель, від яких займалася вата | – | – |
| Категорія згідно з UL94 | НВ | V-0 |

*Джерело:* розроблено авторами

Зразок модифікованої композиції під дією полум'я деформувався та не підтримував горіння після видалення пальника. Під час випробування зразків у вертикальному положенні тривалість їх горіння після двократного піднесення полум'я пальника була меншою за 10 с, а загальна тривалість горіння серії із п'яти зразків не перевищувала 50 с. Не спостерігалося горіння і тління зразка до затискача, краплепадіння й займання підкладеної вати. Горіння та тління зразків після другого видалення полум'я тривало не більше 30 с. Отже, згідно з UL94 такий зразок належить до найвищої категорії щодо стійкості до горіння V-0.

Застосування запропонованого антипірену впливає і на димоутворювальну здатність епоксіамінних композицій (табл. 4). Коефіцієнт димоутворення композиції із вмістом купрум (II) гексафлуорсилікату знижується приблизно в 1,8 раза порівняно з немодифікованою композицією. Обидві композиції належать до матеріалів з високою димоутворювальною здатністю в режимі тління. В режимі горіння композиція ЕД/*рера*-$CuSiF_6$ класифікується як матеріал з помірною димоутворювальною здатністю.

*Таблиця 4* – Результати експериментального визначення коефіцієнта димоутворення епоксіамінних композицій

| Показник | Композиція | |
|---|---|---|
| | ЕД/*рера* | ЕД/*рера*-$CuSiF_6$ |
| Режим тління (без полум'я, що ініціює) | | |
| Коефіцієнт димоутворення $D_m$, $м^2/кг$ | 901,73 | 506,18 |
| Група за димоутворювальною здатністю | Д3 | Д3 |
| Режим горіння (з полум'ям, що ініціює) | | |
| Коефіцієнт димоутворення $D_m$, $м^2/кг$) | 644,00 | 348,24 |
| Група за димоутворювальною здатністю | Д3 | Д2 |

*Джерело:* розроблено авторами

Підсумовуючи отримані дані, можна стверджувати, що розроблені епоксіамінні композиції мають підвищену стійкість до займання порівняно з немодифікованими композиціями, є важкогорючими та самозгасаючими, що є передумовою використання їх з метою вогнезахисту деревини. Ефективність вогнезахисної дії покриття для деревини оцінювали через порівняння двох зразків сосни: одного – покритого епоксидною композицією без антипірену, а іншого – композицією модифікованою $CuSiF_6$.

Проведені дослідження показали (табл. 4), що втрата маси зразків деревини, обробленої купрумвмісною композицією, становила 6,9%. Це означає, що розроблене покриття належить до I групи вогнезахисної ефективності і дає змогу отримати важкогорючий матеріал на основі деревини. Покриття на основі вихідної композиції не в змозі забезпечити вогнезахист деревини, оскільки втрата маси такого зразка значно перевищує 25%.

*Таблиця 5* – Результати випробувань вогнезахисної ефективності епоксіамінних композицій, нанесених на поверхню деревини

| Показник властивостей покриття | Покриття на основі епоксидної композиції | |
|---|---|---|
| | ЕД/*epa* | ЕД/*epa*-$CuSiF_6$ |
| Втрата маси після випробувань, % | 83,5 | 6,9 |
| Група вогнезахисної ефективності | покриття не забезпечує вогнезахисту | I |

*Джерело:* розроблено авторами

Відомо [1], що вогнезахисна ефективність покриття залежить від інтенсивності його розкладу внаслідок температурного впливу, утворення негорючих газів та твердого карбонізованого залишку. Процеси комплексоутворення в системі ЕД/*epa*-$CuSiF_6$ супроводжуються появою координаційних зв'язків Cu(II)–N. З огляду на це введення $CuSiF_6$ в епоксіамінну композицію призводить до ущільнення просторової сітки полімеру та зниження молекулярної рухливості її міжвузлових ділянок. Це відображається у зниженні реакційної здатності полімерних ланцюгів у процесі термоокисної деструкції та суттєвому підвищенні термоокисної стійкості модифікованих композицій. Вирішальну роль відіграє можливість розкладу $CuSiF_6$ під дією температури з утворенням купрум(II) фториду та силіцій(IV) фториду, що змінює хід деструкції епоксиполімеру в напрямку утворення великої кількості негорючих продуктів.

**Висновки та напрями подальших досліджень.** Сукупність усіх результатів експериментальних досліджень, наведених у роботі, продемонструвала особливу роль процесу комплексоутворення в системі негорюча сіль перехідного металу – горючий амінний затвердник епоксидних смол у зниженні параметрів пожежовибухонебезпечності матеріалів на основі епоксіамінних композицій. Поява додаткових хімічних зв'язків (Cu(II)–N) відображається у підвищенні температур займання та самозаймання композицій, зниженні коефіцієнта димоутворення та переводить їх з категорії НВ в категорію V-0, з групи горючих матеріалів середньої займистості в групу важкогорючих. Це стало запорукою використання модифікованих епоксиполімерів для вогнезахисної обробки деревини. Встановлено, що вогнезахисні покриття для деревних конструкцій на основі отриманих композицій належать до I групи вогнезахисної ефективності, в той час як покриття на основі епоксіамінної композиції, що не містить антипірену, взагалі не забезпечує вогнезахисту деревини.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ


1. Григоренко О. М. Підвищення ефективності протипожежного захисту деревини з використанням епоксидних композицій зі зниженим димоутворенням : монографія. Харків : НУЦЗУ, КП «Міська друкарня», 2014. 96 с.
2. Nikolic M., Lawther J.M., Sanadi A.R. Use of nanofillers in wood coatings : a scientific review. J Coat Technol Res, 2015. Vol. 12(3). P. 445–61.
3. Xiao Z., Liu S., Zhang Z., Mai C., Xie Y., Wang Q. Fire retardancy of an aqueous, intumescent, and translucent wood varnish based on guanylurea phosphate and melamine-urea-formaldehyde resin. Prog Org Coat., 2018. Vol. 121. P. 64–72.
4. Пушкаренко А. С. Вогнезахист будівельних конструкцій і матеріалів. Проблеми пожежної безпеки, 2006. Вип. 20. С. 158– 161.
5. Жартовський В. М., Цапко Ю. В., Барило О. Г., Маладика І. Г., Цапко О. Ю. Новий підхід щодо профілактики горіння деревини та виробів з неї. Пожежна безпека: теорія і практика: зб. наук. пр., 2008. № 1. С. 44–48.
6. Яковлева Р. А., Дмітрієва Н. В. Надання вогнестійкості деревині покриттями на основі епоксиполімерів. *Науковий вісник УкрНДІПБ. 2005.* № 1. С. 63–65.
7. Григоренко О. М., Золкіна Є. С. Дослідження спучування вогнезахисних епоксиамінних покриттів, модифікованих металовмісними добавками. *Проблеми пожежної безпеки*, 2018. Вип. 43. С. 31–37.
8. Wu Z., Chen M., Yang H., Hu Y. The Smoke Suppression Effect of Copper Oxide on the Epoxy Resin/Intumescent Flame Retardant / Titanate Couple Agent System. International Journal of Agricultural and Biosystems Engineering, 2010. Vol. 4. № 5. С. 364–366.
9. Manzi-Nshuti C., Wu Y., Nazarenko S. A Comparative Study of the Fire RetardantEffect of Several Metal-Based Compounds Added to an Epoxy-Amine Thermoset Charles. In Fire and Polymers VI : New Advances in Flame Retardant Chemistry and Science ; Morgan A. et al. ; ACS Symposium Series ; American Chemical Society : Washington, 2012. P. 83–96.
10. Пархоменко В.-П. О., Лавренюк О. І., Михалічко Б. М. Перспективи застосування силіційумісних антипіренів для зниження горючості епоксидних композицій. Вісник ЛДУБЖД. 2017. № 15. С. 94–100.
11. Пархоменко В.-П. О., Лавренюк О. І., Михалічко Б. М. Визначення групи горючості епоксіамінних композицій, модифікованих солями купруму (II). Проблеми пожежної безпеки, 2017. Вип. 41. С. 124–128.
12. Lavrenyuk H., Kochubei V., Mykhalichko O., Mykhalichko B. Development and thermal behavior of a new type of polymer materials with reduced combustibility based on epoxy–amine composites modified with copper(II) hexafluorosilicate. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2022. Vol. 147(3). P. 2197–2207.
13. Lavrenyuk H., Mykhalichko B., Kochubei V., Mykhalichko O. Novel CuSiF6-coordinated epoxy–amine composites with reduced combustibility : Elaboration, thermal-oxidative behavior, and ignition susceptibility. Polymer Bulletin. 2022. Vol. 79(1). P. 157– 178.
14. Лавренюк О. І., Михалічко Б. М., Пархоменко В.-П. О. Антипірен-отверджувач для епоксидних смол та самозгасаюча епоксіамінна композиція. Патент на винахід № 118709. Україна. МПК C08L63/00. Заявл. 06.03.2017, № a201702083. Опубл. 25.02.2019,.Бюл. № 4. 2 с.


## REFERENCES


1. Hryhorenko, O. M. Pidvyshchennya efektyvnosti protypozhezhnoho zakhystu derevyny z vykorystannyam epoksydnykh kompozytsiy zi znyzhenym dymoutvorennyam : monohrafiya. Kh. : NUTSZU, KP «Mis'ka drukarnya», 2014. 96 s.
2. Nikolic, M., Lawther, J. M., Sanadi, A. R. Use of nanofillers in wood coatings: a scientific review. J Coat Technol Res, 2015. Vol. 12(3). P. 445–61.
3. Xiao, Z., Liu, S., Zhang, Z., Mai, C., Xie, Y., Wang, Q. Fire retardancy of an aqueous, intumescent, and translucent wood varnish based on guanylurea phosphate and melamine-urea-formaldehyde resin. Prog Org Coat., 2018. Vol. 121. P. 64–72.
4. Pushkarenko, A. S. Vohnezakhyst budivel'nykh konstruktsiy i materialiv. Problemy pozhezhnoyi bezpeky. 2006. Iss. 20. S. 158– 161.
5. Zhartovs'kyy, V. M., Tsapko, Yu., V., Barylo, O. H., Maladyka, I. H., Tsapko, O. Yu. Novyy pidkhid shchodo profilaktyky horinnya derevyny ta vyrobiv z neyi. Pozhezhna bezpeka : teoriya i praktyka: zb. nauk. pr., 2008. № 1. S. 44–48.
6. Yakovleva, R. A., Dmitriyeva, N. V. Nadannya vohnestiykosti derevyni pokryttyamy na osnovi epoksypolimeriv. Naukovyy visnyk UkrNDIPB, 2005. № 1. S. 63–65.
7. Hryhorenko, O. M., Zolkina, YE. S. Doslidzhennya spuchuvannya vohnezakhysnykh epoksyaminnykh pokryttiv, modyfikovanykh metalovmisnymy dobavkamy. Problemy pozhezhnoyi bezpeky. 2018. Iss. 43. S. 31–37.
8. Wu, Z., Chen, M., Yang, H., Hu, Y. The Smoke Suppression Effect of Copper Oxide on the Epoxy Resin / Intumescent Flame Retardant / Titanate Couple Agent System. International Journal of Agricultural and Biosystems Engineering. 2010. Vol. 4. № 5. C. 364–366.
9. Manzi-Nshuti, C., Wu, Y., Nazarenko, S. A Comparative Study of the Fire RetardantEffect of Several Metal-Based Compounds Added to an Epoxy-Amine Thermoset Charles. In Fire and Polymers VI : New Advances in Flame Retardant Chemistry and Science; Morgan A. et al.; ACS Symposium Series ; American Chemical Society : Washington, 2012. P. 83–96.
10. Parkhomenko, V.-P. O., Lavrenyuk, O. I., Mykhalichko, B. M. Perspektyvy zastosuvannya sylitsiyumisnykh antypireniv dlya znyzhennya horyuchosti epoksydnykh kompozytsiy. Visnyk LDUBZHD, 2017. № 15. S. 94–10.
11. Parkhomenko, V.-P. O., Lavrenyuk, O. I., Mykhalichko, B. M. Vyznachennya hrupy horyuchosti epoksiaminnykh kompozytsiy, modyfikovanykh solyamy kuprumu (II). Problemy pozhezhnoyi bezpeky, 2017. Iss. 41. S. 124–28.
12. Lavrenyuk, H., Kochubei, V., Mykhalichko, O., Mykhalichko, B. Development and thermal behavior of a new type of polymer materials with reduced combustibility based on epoxy–amine composites modified with copper(II) hexafluorosilicate. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2022. Vol. 147(3). P. 2197–2207.
13. Lavrenyuk H., Mykhalichko B., Kochubei V., Mykhalichko O. Novel $CuSiF_6$-coordinated epoxy–amine composites with reduced ombustibility : Elaboration, thermal-oxidative behavior, and ignition susceptibility. Polymer Bulletin, 2022. Vol. 79(1). P. 157– 178.
14. Lavrenyuk, O. I., Mykhalichko, B. M., Parkhomenko, V.-P. O. Antypiren-otverdzhuvach dlia epoksydnykh smol ta samozghasaiucha epoksiaminna kompozytsiia : pat. 02083 Ukraina : MPK C08L63/00; № a201702083 ; zaiavl. 06.03.2017 ; opubl. 25.02.2019, Biul. № 4. 2 s.

# TECHNOLOGY OF FIRE PROTECTION OF WOOD WITH COATINGS BASED ON MODIFIED EPOXY-AMINE COMPOSITES

*V.-P. Parkhomenko, P. Borysiak, O. Lavrenyuk, B. Mykhalichko*

*Lviv State University of Life Safety, Ukraine*

KEYWORDS:

epoxy-amine composites; copper (II) hexafluorsilicate; wood, fire-retardant coatings; fire-retardant efficiency

ANNOTATION

The results of development of technology for obtaining and applying fire-retardant coating for wood based on epoxy-amine composites modified with CuSiF6 are presented, and its fire-retardant efficiency is evaluated. It was found that modification of epoxy-amine composites with copper (II) hexafluorosilicate results in an increase in ignition and self-ignition temperatures by 28ºC and 52ºC, respectively, a sharp decrease in flammability and transfers them from the group of combustible materials of medium flammability to the group of difficult combustible materials. Due to the incorporation of flame retardant into the epoxy-amine composite, the smoke-forming coefficient in the mode of combustion and smoldering is significantly reduced, which ensures the possibility of obtaining materials with moderate smoke-forming ability. An experimental study of the flame spread on the surface of samples of epoxy-polymer materials showed that copper-containing composites do not propagate flame and belong to the highest category of resistance to combustion V-0. The obtained coatings on the basis of modified epoxy-amine composites on fire-retardant efficiency belong to I group. The combination of all the results of experimental studies presented in the work demonstrated the special role of the complexation process in the system of non-combustible transition metal salt - combustible amine hardener of epoxy resins in reducing fire and explosion hazard parameters of materials based on epoxy-amine composites. The appearance of additional chemical bonds (Cu(II)←N) is reflected in the increase of ignition and self-ignition temperatures of the composites, decrease in the smoke-forming coefficient and transfers them from category HB to category V-0, from the group of combustible materials of medium flammability to the group of difficult combustible. This is the key to the use of modified epoxy-polymers for fire-retardant wood treatment. It was found that fire-retardant coatings for wooden structures based on the obtained compositions belong to I group of fire-retardant efficiency, while the coating based on the original composition does not provide fire-retardant wood.

*УДК 614.841.45*

# ВПЛИВ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОГНЕЗАХИСНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ТЕПЛОВИЙ СТАН СТАЛЕВИХ КОЛОН ЗА СТАНДАРТНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ

*https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.1.88-110*

Новак С. В[1]*., ORCID iD 0000-0001-7087-318X
Дріжд В. Л.[2]., ORCID iD 0000-0003-2507-7007
Добростан О. В[1]. ORCID iD 0000-0001-8908-0729
Новак М. С. ORCID iD 0000-0002-5888-5812
*E-mail: novak.s.fire@gmail.com

*[1]Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Україна*
*[2] Інститут фізико-органічної хімії і вуглехімії ім. Л. М.Литвиненка, Україна*

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

*Надійшла до редакції: 24.05.2022*
*Пройшла рецензування: 02.06.2022*

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

вогнезахисний матеріал; коефіцієнт теплопровідності; критична температура сталі; необхідна мінімальна товщина; сталева колона; стандартний температурний режим; теплофізичні властивості

АНОТАЦІЯ

Зважаючи на необхідність оптимізації параметрів систем вогнезахисту будівельних конструкцій для подальшого удосконалення і розвитку технології таких систем, актуальним є дослідження, спрямоване на визначення впливу теплофізичних властивостей вогнезахисних матеріалів, які є компонентами систем вогнезахисту, на тепловий стан сталевих колон в умовах стандартного температурного режиму. За мету ставилось з'ясування залежностей між необхідною мінімальною товщиною систем вогнезахисту, теплофізичними властивостями вогнезахисних матеріалів, які є компонентами систем вогнезахисту, критичною температурою сталі, коефіцієнтом поперечного перерізу і проміжком часу збереженості вогнестійкості сталевих колон. Для досягнення цього було вирішено завдання з визначення даних щодо необхідної мінімальної товщини вогнезахисних покриттів для досліджуваних систем вогнезахисту, узагальнення отриманих розрахункових даних і виявлення залежності цієї товщини від теплофізичних властивостей вогнезахисних матеріалів та інших параметрів систем вогнезахисту. Встановлено, що значення цієї товщини як для систем із вогнезахисним екраном, так і без нього, суттєво залежить від коефіцієнта теплопровідності застосованих вогнезахисних матеріалів $\lambda_p$, коефіцієнта поперечного перерізу $A_m/V$,, критичної температури сталі $\theta_{cr}$ і проміжку часу збереженості вогнестійкості $t_{fr}$. З підвищенням $\lambda_p$, $A_m/V$, $t_{fr}$ і зменшенням $\theta_{cr}$ товщина $d_{p,min}$ збільшується. Показано, що у разі застосування для сталевих колон систем вогнезахисту з вогнезахисним екраном закономірним є зменшення товщини вогнезахисту $d_{p,min}$ порівняно із системами без екрана. Абсолютна різниця $\Delta_{d,AB}$ і відносна різниця $\delta_{d,AB}$ між значенням товщини покриття, отриманим для системи без вогнезахисного екрана, і значенням товщини покриття, отриманим для системи з вогнезахисним екраном без вогнезахисного покриття на його поверхні, змінюються в діапазонах від 0,06 мм до 15,5 мм і від 0,35 % до 51,6 % відповідно. Для систем вогнезахисту з екраном і вогнезахисним покриттям на його поверхні та/або на поверхні колони величина необхідної мінімальної товщини вогнезахисту є найбільш зменшеною порівняно із системами без екрана для малих значень коефіцієнта поперечного перерізу $(A_m/V)_{min}$ і проміжку часу збереженості вогнестійкості $t_{fr,min}$. Визначено дані щодо різниці між значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисту, отриманими для систем із вогнезахисним покриттям на зовнішній поверхні екрана і без нього.

**Постановка проблеми.** Відповідно до EN 13501-2:2016 [1] для колон характеристичним критерієм є несуча здатність, встановлено такі класи за вогнестійкістю: R 15, R 20, R 30, R 45, R 60, R 90, R 120, R 180, R 240 та R 360. Згідно з положеннями Будівельного Єврокоду № 3 [2] вогнестійкість сталевих колон за температурним критерієм вважають забезпеченою у разі виконання такої умови:

$$\theta_a \le \theta_{a,cr}, \quad (1)$$

де $\theta_a$ – фактична температура сталевої колони (далі – сталі), °С;

$\theta_{a,cr}$ – критична температура сталевої колони, °С.

Критичною температурою сталевої колони (далі – сталі) є температура, за якої очікується руйнування цієї колони за рівномірного розподілу температури для заданого рівня навантаження.

Умову (1) має бути виконано для проміжку часу (у хвилинах) вогневого впливу за стандартного температурного режиму, який відповідає проміжку часу класифікації колони за вогнестійкістю, наведеному після літери R у зазначенні класу вогнестійкості.

На об’єктах будівництва широко використовують сталеві колони двотаврового поперечного перерізу (I або H) з короткими або довгими полицями, а також пустотілі колони круглого або прямокутного поперечного перерізу [3–4].

Незахищені сталеві колони зазвичай зберігають вогнестійкість протягом проміжку часу вогневого впливу за стандартного температурного режиму, який складає не більше ніж 10 хв. Для підвищення цього проміжку часу застосовують різні засоби вогнезахисту. До них належать пасивні і реактивні системи вогнезахисту, профільовані й коробчасті системи вогнезахисту, вертикальні вогнезахисні екрани, комбіновані системи вогнезахисту [3–7]. Тепловий стан сталевих колон, оснащених вогнезахистом (далі – захищених сталевих колон), значною мірою залежить від параметрів системи вогнезахисту, яку для них застосовують, зокрема від теплофізичних властивостей і товщини вогнезахисного покриття або облицювання [8]. Через брак даних щодо впливу теплофізичних властивостей вогнезахисних матеріалів на цей тепловий стан не можна проводити оптимізацію параметрів систем вогнезахисту сталевих колон, наприклад за масо-габаритним критерієм (мінімізація маси та/або товщини системи вогнезахисту). З огляду на необхідність такої оптимізації для подальшого удосконалення і розвитку технології вогнезахисту сталевих колон актуальним слід вважати дослідження, спрямоване на визначення впливу теплофізичних властивостей вогнезахисних матеріалів, які є компонентами систем вогнезахисту, на тепловий стан сталевих колон в умовах стандартного температурного режиму.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Незахищені сталеві конструкції, такі як колони і балки, через велику теплопровідність сталі, в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму швидко (протягом декількох хвилин) прогріваються до критичної температури, яка зазвичай знаходиться в діапазоні від 350 °С до 700 °С [2–4]. Для сталевих конструкцій, оснащених вогнезахистом, інтенсивність нагрівання менша, а проміжок часу настання критичної температури більший, ніж у незахищених сталевих конструкцій.

Типове підвищення температури сталевих конструкцій, оснащених реактивним вогнезахисним покриттям, що спучується, характеризується трьома стадіями [9]. Приклад теплового стану таких двох сталевих конструкцій з однаковою товщиною вогнезахисного покриття, яка складає 0,8 мм, і різним коефіцієнтом поперечного перерізу в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму наведено на рис. 1 [6]. На першій стадії, на якій температура сталі нижча за 200 °С, швидкість зростання температури цих сталевих конструкцій висока. Це пов’язано

з тим, що теплофізичні і хімічні властивості реактивного вогнезахисного матеріалу на цій стадії не зазнають істотних змін. Завдяки цьому і порівняно високим значенням коефіцієнта теплопровідності та густини реактивного вогнезахисного матеріалу, а також наявності тонкого шару вогнезахисного покриття на цій стадії має місце значне підвищення температури сталі. На другій стадії, на якій температура сталі має значення від 200 °С до 350 °С, покриття зазнає повного спучування з утворенням товстого шару з низькою густиною і звугленим вогнезахисним шаром, що має низьку теплопровідність. Швидкість зростання температури сталі на цій стадії зменшується порівняно з першою. На третій стадії, на якій температура сталі більша за 350 °С, теплопровідність покриття збільшується завдяки його високій температурі, втраті маси і зменшенню товщини. Швидкість зростання температури сталі на цій стадії помітно підвищується порівняно з другою стадією.

Значення коефіцієнта теплопровідності реактивних вогнезахисних матеріалів, що спучуються, суттєво залежить від температури і початкової товщини вогнезахисного покриття, а також коефіцієнта поперечного перерізу сталевої конструкції та змінюється в широкому діапазоні: від 0,002 Вт/(м·°С) до 0,15 Вт/(м·°С) [8; 10–13]. Що ж до інших теплофізичних властивостей цих матеріалів, таких як питома теплоємність і густина, то їхня залежність від зазначених параметрів є менш значною, ніж для коефіцієнта теплопровідності [8], і зазвичай під час розрахунків теплового стану захищених сталевих конструкцій їхні значення приймають сталими [2–3].

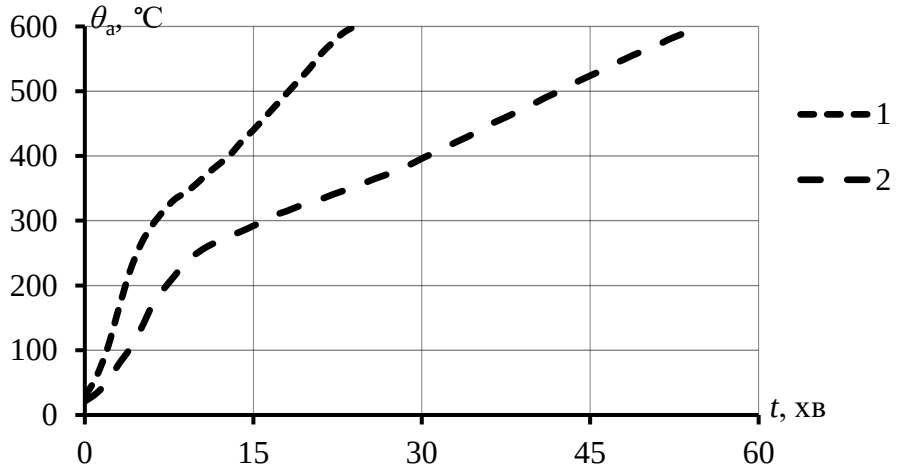



*Рисунок 1* – Залежність температури сталі від тривалості вогневого впливу за стандартного температурного режиму для сталевих конструкцій з реактивним вогнезахисним матеріалом, що спучується, і різним коефіцієнтом поперечного перерізу: 1 – $A_m/V$ = 200 м$^{-1}$, 2 – $A_m/V$ = 100 м$^{-1}$ [6]

*Джерело:* розроблено авторами

Порівняно з реактивними вогнезахисними покриттями, що спучуються, пасивні вогнезахисні матеріали (через те, що в них під час вогневого впливу не відбувається перебіг хімічних реакцій) мають більш стабільні теплофізичні властивості, які монотонно залежать тільки від температури. Залежно від типу пасивного вогнезахисного матеріалу значення коефіцієнта теплопровідності може бути від 0,1 Вт/(м·°С) до 2,0 Вт/(м·°С) [8; 14–15]. Під час розрахунків теплового стану сталевих конструкцій з пасивними

вогнезахисними матеріалами їхню питому теплоємність і густину також зазвичай приймають сталими [2–3]. Приклад теплового стану таких двох захищених сталевих конструкцій з однаковою товщиною вогнезахисного покриття, яка складає 15 мм, і різним коефіцієнтом поперечного перерізу в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму наведено на рис. 2 [6]. Залежність температури сталі для цих конструкцій має монотонно зростаючий характер, без наявності точок перегину.

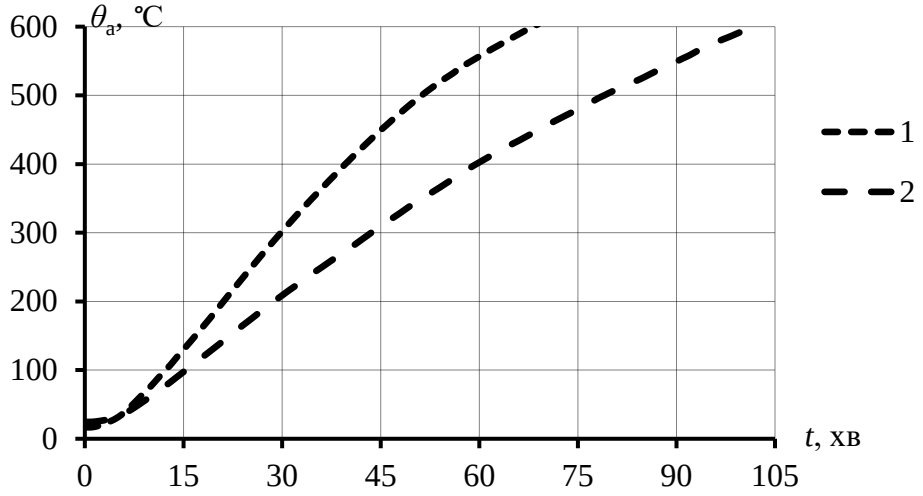



*Рисунок 2* – Залежність температури сталі від тривалості вогневого впливу за стандартного температурного режиму для сталевих конструкцій з пасивним вогнезахисним матеріалом і різним коефіцієнтом поперечного перерізу: 1 – $A_m/V$ = 200 м$^{-1}$, 2 – $A_m/V$ = 100 м$^{-1}$ [6]

*Джерело:* розроблено авторами

Характер залежності температури сталевих конструкцій з комбінованою системою вогнезахисту, для якої реактивне покриття наносять на зовнішню поверхню пасивного матеріалу, від тривалості вогневого впливу за стандартного температурного режиму є таким же, як і для сталевих конструкцій з пасивною системою вогнезахисту [6]. Відмінністю між тепловими станами сталевих конструкцій із зазначеними системами вогнезахисту, які мають однакову товщину покриття, є збільшення проміжку часу збереженості вогнестійкості для конструкцій з комбінованою системою порівняно з пасивною системою вогнезахисту.

У роботі [7] за проведеним дослідженням визначено особливості залежності температури сталевих колон двотаврового профілю із системою вогнезахисту, в якій застосовано вогнезахисне покриття поверхні колони і вогнезахисний екран коробчастої форми з оцинкованої сталі завтовшки 0,5 мм, від тривалості вогневого впливу за стандартного температурного режиму. За результатами зазначеного дослідження встановлено ефективність застосування вогнезахисних екранів із вогнезахисним покриттям на його поверхні і без нього для підвищення вогнестійкості сталевих колон.

Наведені вище результати досліджень дають змогу обґрунтовано підходити до визначення параметрів складових систем вогнезахисту для сталевих конструкцій, в яких використовують вогнезахисні матеріали конкретних торговельних марок. У цих дослідженнях розглянуто тепловий стан сталевих конструкцій, оснащених конкретними типами вогнезахисних матеріалів, в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму, однак в їх результатах немає даних щодо впливу теплофізичних властивостей

вогнезахисних матеріалів на цей тепловий стан. Також немає даних стосовно залежностей між необхідною мінімальною товщиною вогнезахисного покриття (або облицювання) теплофізичними властивостями застосовних вогнезахисних матеріалів і параметрами сталевих конструкцій (коефіцієнтом поперечного перерізу, критичною температурою сталі й проміжком часу збереженості вогнестійкості). Через брак таких даних не можна проводити оптимізацію параметрів систем вогнезахисту сталевих колон, наприклад за масо-габаритним критерієм (мінімізація маси та/або товщини системи вогнезахисту). Така невизначеність зумовила проведення дослідження впливу теплофізичних властивостей вогнезахисних матеріалів, які є компонентами систем вогнезахисту, на тепловий стан сталевих колон в умовах стандартного температурного режиму.

**Формулювання цілей досліджень.** За мету ставилось визначення залежностей між необхідною мінімальною товщиною систем вогнезахисту, теплофізичними властивостями вогнезахисних матеріалів, які є компонентами систем вогнезахисту, критичною температурою сталі, коефіцієнтом поперечного перерізу і проміжком часу збереженості вогнестійкості сталевих колон. Для її досягнення було поставлено такі завдання:

- визначити системи вогнезахисту сталевих колон, які підлягають дослідженню;
- визначити теплофізичні властивості вогнезахисних матеріалів, які є компонентами систем вогнезахисту, діапазони критичної температури сталі, коефіцієнт поперечного перерізу і проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих колон, що застосовані у дослідженні;
- розробити процедуру визначення залежностей необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття від теплофізичних властивостей вогнезахисних матеріалів, які є компонентами систем вогнезахисту, критичної температури сталі, коефіцієнта поперечного перерізу і проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих колон;
- для обраних діапазонів теплофізичних властивостей вогнезахисних матеріалів, які є компонентами систем вогнезахисту, критичної температури сталі, коефіцієнта поперечного перерізу і проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих колон визначити дані щодо необхідної мінімальної товщини вогнезахисних покриттів для досліджуваних систем вогнезахисту, узагальнити отримані розрахункові дані і з'ясувати залежності цієї товщини від теплофізичних властивостей вогнезахисних матеріалів і зазначених вище параметрів сталевих колон та проаналізувати їх.

**Методи дослідження.** Застосовано метод дослідження, складовими якого є обчислювальні процедури чисельного моделювання теплового стану сталевих колон, оснащених вогнезахисними матеріалами із заданими теплофізичними властивостями, в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму, операції аналізу, порівняння, узагальнення та систематизації отриманих розрахункових даних. Для розрахунку теплового стану захищених сталевих колон в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму використано одномірні математичні моделі теплопровідності. Для сталевих колон з одним шаром вогнезахисного покриття (або облицювання) ця модель складається з такої системи рівнянь:

$$c_a \rho_a \frac{\partial \theta_a}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left( \lambda_a \frac{\partial \theta_a}{\partial x} \right); \qquad (2)$$

$$0 < x < x_1;\ \theta_a = \theta_a(x,t);$$

$$c_p \rho_p \frac{\partial \theta_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left( \lambda_p \frac{\partial \theta_p}{\partial x} \right); \qquad (3)$$

$$x_1 < x < x_2;\ \theta_p = \theta_p(x,t);$$

– початкова умова:

$$\theta_a(x,0) = \theta_p(x,0) = \theta_0; \quad (4)$$

$$\lambda_p \frac{\partial \theta_p}{\partial x} = \alpha^*(\theta_t - \theta_{p,s}); \quad (5)$$

– гранична умова на обігрівній поверхні вогнезахисного покриття, за $x = x_2$:

$$\alpha^* = \alpha_c + \Phi \varepsilon_{p,s} \varepsilon_f \sigma[(\theta_t + 273)^4 - (\theta_{p,s} + 273)^4] / (\theta_t - \theta_{p,s}); \quad (6)$$

$$\theta_t = 20 + 345\lg(0{,}133t + 1); \quad (7)$$

– гранична умова на поверхні колони, за $x = x_1$:

$$\lambda_p \frac{\partial \theta_p}{\partial x} = \lambda_a \frac{\partial \theta_a}{\partial x}; \quad (8)$$

$$\theta_a = \theta_p; \quad (9)$$

– гранична умова в точці теплової симетрії сталевої колони, за $x = 0$:

$$\frac{\partial \theta_a}{\partial x} = 0, \quad (10)$$

де $x$ – координата, м;

$x_1$ – координата поверхні колони, м;

$x_2$ – координата обігрівної (зовнішньої) поверхні вогнезахисного покриття, м;

$t$ – тривалість вогневого впливу, с;

$\alpha_c$ – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією на обігрівній поверхні вогнезахисного покриття, який становить 25 Вт/(м$^2$·°С) [16–17];

$\alpha^*$ – сумарний коефіцієнт тепловіддачі конвекцією та тепловим випромінюванням на обігрівній поверхні вогнезахисного покриття, Вт/(м$^2$·°С);

$\Phi$ – кутовий коефіцієнт, який становить 1,0 [16–17];

$\varepsilon_{p,s}$ – коефіцієнт теплового випромінювання обігрівної поверхні вогнезахисного покриття, який становить 0,8 [16–17];

$\varepsilon_f$ – коефіцієнт теплового випромінювання нагрівального газового середовища, який становить 1,0 [16–17];

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

$\theta_a$ – температура сталі, °С;

$\theta_p$ – температура вогнезахисного покриття, °С;

$\theta_t$ – температура нагрівального газового середовища за стандартного температурного режиму, °С;

$\theta_{p,s}$ – температура обігрівної (зовнішньої) поверхні вогнезахисного покриття, °С;

$\theta_0$ – початкова температура, яка становить 20 °С [16–7];

$c_a$ – питома теплоємність сталі, Дж/(кг·°С);

$c_p$ – питома теплоємність вогнезахисного матеріалу, Дж/(кг·°С);

$\rho_a$ – густина сталі, кг/м$^3$;

$\rho_p$ – густина вогнезахисного матеріалу, кг/м$^3$;

$\lambda_a$ – коефіцієнт теплопровідності сталі, Вт/(м·°С);

$\lambda_p$ – коефіцієнт теплопровідності вогнезахисного матеріалу, Вт/(м·°С).

Для сталевих колон із системами вогнезахисту, які містять вогнезахисний екран, математична модель складається із системи рівнянь, яка є аналогічною (2) – (10) та має додаткові рівняння теплопровідності для інших вогнезахисних

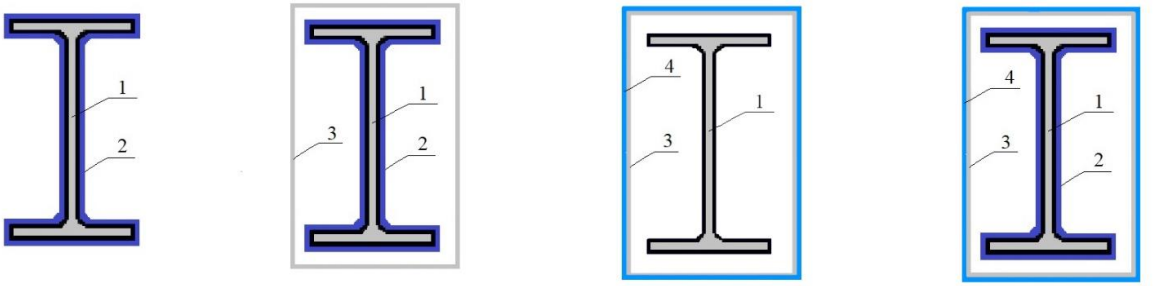
шарів цих систем і відповідні граничні умови між ними. Розв'язання математичної моделі виконано методом кінцевих різниць за неявною схемою апроксимації і використанням пакета прикладних програм FRIEND [18].

**Виклад основного матеріалу.** Для дослідження було обрано такі чотири системи вогнезахисту сталевих колон:

- система вогнезахисту із вогнезахисним покриттям на поверхні колони (далі – система *A*, рис. 3);
- система вогнезахисту, яка складається із вогнезахисного покриття на поверхні колони і вогнезахисного екрана без вогнезахисного покриття (далі – система *B*, рис. 3);
- система вогнезахисту, яка складається із вогнезахисного екрана із вогнезахисним покриттям на його зовнішній поверхні (далі – система *C*, рис. 3);
- система вогнезахисту, яка складається із вогнезахисного покриття на поверхні колони і вогнезахисного екрана із вогнезахисним покриттям на його зовнішній поверхні (далі – система *D*, рис. 3).

У системах *B*, *C*, *D* застосовано вогнезахисні екрани коробчастого профілю зі сталі завтовшки 0,5 мм.

Вибір зазначених систем вогнезахисту обґрунтовано тим, що їхнє застосування під час дослідження дає змогу визначити вплив кожного компонента систем вогнезахисту на тепловий стан сталевих колон, проміжок часу збереженості їхньої вогнестійкості та необхідну мінімальну товщину цих компонентів.




Система *A* Система *B* Система *C* Система *D*

*Рисунок 3* – Системи вогнезахисту сталевих колон. 1 – сталева колона; 2 – вогнезахисне покриття поверхні колони; 3 – вогнезахисний екран; 4 – вогнезахисне покриття зовнішньої поверхні екрану

*Джерело:* розроблено авторами

Обрані діапазони теплофізичних властивостей вогнезахисних матеріалів, які є компонентами зазначених систем вогнезахисту сталевих колон і застосовні під час чисельного моделювання теплового стану сталевих колон, були такими. Мінімальне і максимальне значення коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного матеріалу становили: $\lambda_{p,min}$ = 0,02 Вт/(м·°С); $\lambda_{p,max}$ = 2,0 Вт/(м·°С). Розрахунки теплового стану захищених сталевих колон в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму проводили за сталим, незалежним від температури та інших параметрів, значенням коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного матеріалу. Було проведено три групи розрахунків, в одній з них цим сталим значенням було $\lambda_{p,min}$, в другій – $\lambda_{p,max}$, в третій – проміжне значення $\lambda_{p,med}$ = 0,2 Вт/(м·°С). Значення питомої теплоємності вогнезахисного матеріалу приймали таким, як зазначено в [2–3], $c_p$ = 1000 Дж/(кг·°С). Густину вогнезахисного матеріалу також вважали сталою величиною, незалежною від температури та інших параметрів, $\rho_p$ = 500 кг/м$^3$.

Діапазони критичної температури сталі, коефіцієнта поперечного перерізу і проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих колон, які можна застосувати під час дослідження, були обрані такими. Мінімальне і максимальне значення критичної температури сталі: $\theta_{cr,min}$ = 350°C; $\theta_{cr,max}$ = 700°C. Мінімальне і максимальне значення коефіцієнта поперечного перерізу: $(A_m/V)_{min}$ = 40 м$^{-1}$; $(A_m/V)_{max}$ = 300 м$^{-1}$. Для діапазону проміжку часу збереженості вогнестійкості: $t_{fr,min}$ = 30 хв; $t_{fr,max}$ = 240 хв. Також для розрахунків теплового стану захищених сталевих колон застосовували такі проміжні значення: $\theta_{cr,med}$ = 500°C; $(A_m/V)_{med}$ = 150 м$^{-1}$; $t_{fr,med}$ = 90 хв.

Процедуру визначення залежностей між необхідною мінімальною товщиною систем вогнезахисту, теплофізичними властивостями вогнезахисних матеріалів, які є компонентами систем вогнезахисту, критичною температурою сталі, коефіцієнтом поперечного перерізу і проміжком часу збереженості вогнестійкості сталевих колон було обрано такою. Для системи вогнезахисту, яку досліджують, шляхом багаторазового розв'язання прямої задачі теплопровідності визначають дані щодо необхідної мінімальної товщини певного вогнезахисного покриття $d_{p,min}$, за якої для тривалості вогневого впливу, що відповідає проміжку часу збереженості вогнестійкості $t_{fr}$, розрахункова температура сталевої колони $\theta_{a,cal}$ із коефіцієнтом поперечного перерізу $A_m/V$ відповідає критичній температурі сталі $\theta_{cr}$. Для систем *A* і *B* цим вогнезахисним покриттям є покриття поверхні колони, а для систем *C*, *D* – покриття зовнішньої поверхні екрана.

Для визначення товщини $d_{p,min}$ задають її початкову наближену величину $d_{p,0}$. Розв'язанням прямої задачі теплопровідності із використанням одномірної математичної моделі, наприклад, (2) – (10) для системи *A*, визначають температуру $\theta_{a,cal}$ на сталевій поверхні колони, за $x = x_1$. Визначають різницю між температурами $\theta_{a,cal}$ і $\theta_{cr}$. Якщо ця різниця знаходиться поза межами ± 0,5 °C, то задають інше наближення товщини $d_{p,0} + \Delta d$ і розв'язанням задачі теплопровідності розраховують нове значення $\theta_{a,cal}$. Ітераційний процес завершують за виконання умови щодо отримання зазначеної вище різниці між температурами $\theta_{a,cal}$ і $\theta_{cr}$.

Такі розрахунки товщини $d_{p,min}$ проводять для всіх вказаних вище значень теплофізичних властивостей вогнезахисних матеріалів, які є компонентами систем вогнезахисту, зокрема для $\lambda_{p,min}$, $\lambda_{p,med}$, $\lambda_{p,max}$, критичної температури сталі, коефіцієнта поперечного перерізу і проміжку часу збереженості вогнестійкості колон. У табл. 1 наведено варіанти розрахунків товщини $d_{p,min}$ для системи *A*, які застосовані для $\lambda_{p,min}$ і $t_{fr,min}$.

*Таблиця 1* – Варіанти розрахунків товщини $d_{p,min}$ для системи *A*, застосовні для $\lambda_{p,min}$ = 0,02 Вт/(м·°C) і $t_{fr,min}$ = 30 хв

| № варіанта | Коефіцієнт теплопровідності $\lambda_p$, Вт/(м·°C) | Коефіцієнт поперечного перерізу $A_m/V$, м$^{-1}$ | Критична температура $\theta_{cr}$, °C | Проміжок часу збереженості вогнестійкості $t_{fr}$, хв |
|---|---|---|---|---|
| *A*1 | 0,02 | 40 | 350 | 30 |
| *A*2 | 0,02 | 150 | 350 | 30 |
| *A*3 | 0,02 | 300 | 350 | 30 |
| *A*4 | 0,02 | 40 | 500 | 30 |
| *A*5 | 0,02 | 150 | 500 | 30 |
| *A*6 | 0,02 | 300 | 500 | 30 |
| *A*7 | 0,02 | 40 | 750 | 30 |
| *A*8 | 0,02 | 150 | 750 | 30 |
| *A*9 | 0,02 | 300 | 750 | 30 |

Загальна кількість варіантів для всіх значень коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного матеріалу і проміжку часу збереженості вогнестійкості колон для цієї системи становить 81.

Аналогічні варіанти розрахунків товщини dp,min застосовні як для системи B (з вогнезахисним екраном без вогнезахисного покриття), так і системи C (з вогнезахисним екраном із вогнезахисним покриттям на його зовнішній поверхні). Для системи D, яка складається із вогнезахисного покриття на поверхні колони і вогнезахисного екрана із вогнезахисним покриттям на його зовнішній поверхні, є такі відмінності. Для системи *D* розрахунки необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття на зовнішній поверхні вогнезахисного екрана $d_{p,min,mem}$ проводять за заданими різними значеннями товщини вогнезахисного покриття на поверхні колони $d_{p,col}$. Величину $d_{p,col}$ задають такою, що дорівнює половині значення необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття на зовнішній поверхні вогнезахисного покриття $d_{p,min}$, отриманого для системи *B*, яка складається із вогнезахисного покриття на поверхні колони і вогнезахисного екрана без вогнезахисного покриття. Значення товщини $d_{p,col}$ залежить від величин коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного покриття на поверхні колони $\lambda_{p,col}$, коефіцієнта поперечного перерізу $A_m/V$, критичної температури $\theta_{cr}$ і проміжку часу збереженості вогнестійкості $t_{fr}$. Процедура розрахунків товщини $d_{p,min,mem}$ для системи *D* є такою. Для варіанта *D*1 задають $\lambda_{p,col} = \lambda_{p,mem} = \lambda_{p,min}$ (однакові значення для вогнезахисного покриття на поверхні колони і вогнезахисного покриття на зовнішній поверхні екрана), $(A_m/V)_{min}$, $\theta_{cr,min}$, $t_{fr,min}$, $d_{p,col}$ та розраховують $d_{p,min,mem,D1}$. Виконують розрахунки $d_{p,min,mem}$ для інших варіантів *D*2 – *D*9 (аналогічно *A*2 – *A*9, табл. 1). За незмінного значення коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного покриття на поверхні колони $\lambda_{p,col} = \lambda_{p,min}$ розраховують товщину $d_{p,min,mem}$ для всіх інших значень коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного покриття на поверхні екрана $\lambda_{p,mem}$ ($\lambda_{p,mem} = \lambda_{p,med}$, $\lambda_{p,mem} = \lambda_{p,max}$) і проміжку часу збереженості вогнестійкості колони $t_{fr}$. Кількість варіантів таких розрахунків становить 81. Змінюють величину коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного покриття на поверхні колони з $\lambda_{p,col} = \lambda_{p,min}$ на $\lambda_{p,col} = \lambda_{p,med}$ та розраховують 81 значення товщини $d_{p,min,mem}$. Аналогічні розрахунки виконують і для іншої величини коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного покриття на поверхні колони, яке становить $\lambda_{p,col} = \lambda_{p,max}$. Загальна кількість варіантів розрахунків товщини $d_{p,min,mem}$ для системи *D* складає 243.

Під час розрахунків товщини $d_{p,min}$ для систем *B* – *D* (з вогнезахисним екраном) повітряний проміжок між зовнішньою поверхнею колони і внутрішньою поверхнею вогнезахисного екрана моделюють віртуальною стінкою, яка має такі параметри: товщину 0,01 м; значення коефіцієнта теплопровідності, що становить 0,198 Вт/(м·°С), 0,941 Вт/(м·°С), 3,57 Вт/(м·°С) за температури 0 °С, 500 °С, 1000 °С відповідно; об'ємну теплоємність $c\rho$ = 1000 Дж/(м$^3$·°С). Ці параметри було отримано за результатами розв'язання оберненої задачі теплопровідності, в якій за вихідні дані використовували значення температури незахищеної сталевої стінки $\theta_a$ для різної тривалості вогневого впливу *t* за стандартного температурного режиму. Ці вихідні дані одержані шляхом розв'язання прямої задачі теплопровідності із застосуванням рівнянь (2), (4) – (7), (10). Під час розв'язання оберненої задачі теплопровідності визначали значення коефіцієнта теплопровідності віртуальної стінки, за яких середньоквадратичне відхилення величин розрахункової температури незахищеної сталевої стінки від вихідних даних щодо цієї температури $\theta_a$ є мінімальним [18]. Отримане значення

цього відхилення, що становить 1,2·°С, свідчить про прийнятність для розрахунків наведених вище параметрів віртуальної стінки, яка моделює проміжок між зовнішньою поверхнею колони і внутрішньою поверхнею вогнезахисного екрану.

Результати розрахунків товщини $d_{p,min}$ для систем *A*, *B*, *C* наведено в табл. 2–4. Із аналізу цих даних випливає наявність для цих систем суттєвої залежності товщини $d_{p,min}$ від коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного покриття $\lambda_p$, коефіцієнта поперечного перерізу $A_m/V$, критичної температури $\theta_{cr}$ і проміжку часу збереженості вогнестійкості $t_{fr}$. З підвищенням $\lambda_p$, $A_m/V$, $t_{fr}$ та зменшенням $\theta_{cr}$ товщина $d_{p,min}$ збільшується.

Так, для системи *A* за $\theta_{cr,med}$ = 500 °С, $t_{fr,med}$ = 90 хв і підвищенні $\lambda_p$ від 0,02 Вт/(м·°С) до 2,0 Вт/(м·°С) товщина $d_{p,min,A}$ збільшується: від 1,13 мм до 88,0 мм – для $(A_m/V)_{min}$ = 40 м$^{-1}$; від 4,26 мм до 161 мм – для $(A_m/V)_{med}$ = 150 м$^{-1}$; від 7,74 мм до 184 мм – для $(A_m/V)_{max}$ = 300 м$^{-1}$ (рис. 4а). За $(A_m/V)_{med}$ = 150 м$^{-1}$, $t_{fr,med}$ = 90 хв і підвищенні $\lambda_p$ від 0,02 Вт/(м·°С) до 2,0 Вт/(м·°С) товщина $d_{p,min,A}$ збільшується: від 1,99 мм до 108 мм – для $\theta_{cr,max}$ = 700 °С; від 4,26 мм до 161 мм – для $\theta_{cr,med}$ = 500 °С; від 7,28 мм до 208 мм – для $\theta_{cr,min}$ = 350 °С (рис. 4б). За $(A_m/V)_{min}$ = 150 м$^{-1}$, $\theta_{cr,med}$ = 500 °С і підвищенні $\lambda_p$ від 0,02 Вт/(м·°С) до 2,0 Вт/(м·°С) товщина $d_{p,min,A}$ збільшується: від 0,96 мм до 55,3 мм – для $t_{fr,min}$ = 30 хв; від 4,26 мм до 161 мм – для $t_{fr,med}$ = 90 хв; від 13,2 мм до 331 мм – для $t_{fr,max}$ = 240 хв (рис. 4в).

*Таблиця 2* – Результати розрахунків товщини $d_{p,min}$ для системи *A*

| $A_m/V$, м$^{-1}$ | $\lambda_p$, Вт/(м·°С) | Товщина $d_{p,min,A}$ (в мм) для: | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $\theta_{cr,min}$, $t_{fr,min}$ | $\theta_{cr,med}$, $t_{fr,min}$ | $\theta_{cr,max}$, $t_{fr,min}$ | $\theta_{cr,min}$, $t_{fr,med}$ | $\theta_{cr,med}$, $t_{fr,med}$ | $\theta_{cr,max}$, $t_{fr,med}$ | $\theta_{cr,min}$, $t_{fr,max}$ | $\theta_{cr,med}$, $t_{fr,max}$ | $\theta_{cr,max}$, $t_{fr,max}$ |
| 40 | 0,02 | 0,44 | 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 |

*Джерело:* розроблено авторами

*Таблиця 3* – Результати розрахунків товщини $d_{p,min}$ для системи *B*

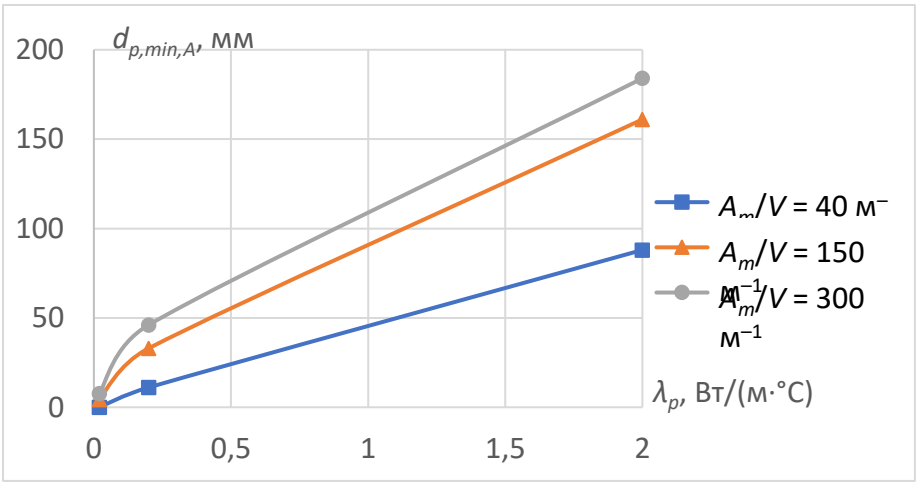
| $A_m/V$, м$^{-1}$ | $\lambda_p$, Вт/(м·°С) | Товщина $d_{p,min,B}$ (в мм) для: | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $\theta_{cr,min}$, $t_{fr,min}$ | $\theta_{cr,med}$, $t_{fr,min}$ | $\theta_{cr,max}$, $t_{fr,min}$ | $\theta_{cr,min}$, $t_{fr,med}$ | $\theta_{cr,med}$, $t_{fr,med}$ | $\theta_{cr,max}$, $t_{fr,med}$ | $\theta_{cr,min}$, $t_{fr,max}$ | $\theta_{cr,med}$, $t_{fr,max}$ | $\theta_{cr,max}$, $t_{fr,max}$ |
| 40 | 0,02 | 0,264 | – | – | 1,98 | 1,05 | 0,40 | 6,69 | 3,87 | 1,91 |
| 150 | 0,02 | 1,74 | 0,82 | 0,16 | 7,14 | 4,16 | 1,91 | 20,1 | 13,1 | 7,07 |
| 300 | 0,02 | 3,46 | 1,82 | 0,56 | 12,0 | 7,63 | 3,71 | 28,6 | 20,7 | 12,7 |
| 40 | 0,2 | 2,57 | – | – | 18,5 | 10,1 | 3,97 | 55,6 | 35,2 | 18,4 |
| 150 | 0,2 | 14,3 | 7,39 | 1,51 | 47,0 | 32,0 | 16,9 | 104 | 79,6 | 52,5 |
| 300 | 0,2 | 22,7 | 14,0 | 4,96 | 60,2 | 45,0 | 27,9 | 121 | 97,3 | 70,8 |
| 40 | 2,0 | 19,9 | – | – | 125 | 79,1 | 35,2 | 303 | 226 | 142 |
| 150 | 2,0 | 70,3 | 42,5 | 10,8 | 198 | 152 | 98,9 | 396 | 323 | 243 |
| 300 | 2,0 | 87,5 | 60,6 | 27,5 | 219 | 174 | 123 | 419 | 348 | 272 |

*Джерело:* розроблено авторами

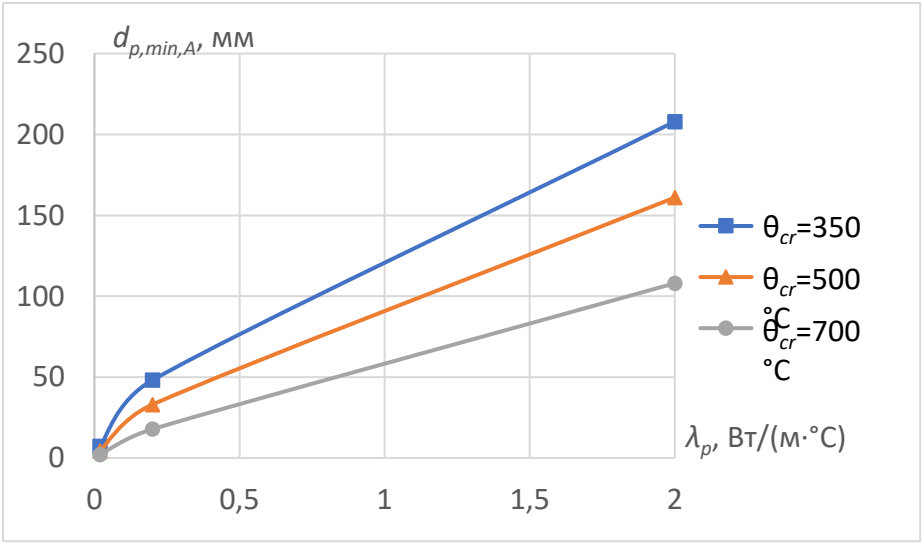
*Таблиця 4* – Результати розрахунків товщини $d_{p,min}$ для системи *C*

| $A_m/V$, м$^{-1}$ | $\lambda_p$, Вт/(м·°C) | Товщина $d_{p,min,C}$ (в мм) для: | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $\theta_{cr,min}$, $t_{fr,min}$ | $\theta_{cr,med}$, $t_{fr,min}$ | $\theta_{cr,max}$, $t_{fr,min}$ | $\theta_{cr,min}$, $t_{fr,med}$ | $\theta_{cr,med}$, $t_{fr,med}$ | $\theta_{cr,max}$, $t_{fr,med}$ | $\theta_{cr,min}$, $t_{fr,max}$ | $\theta_{cr,med}$, $t_{fr,max}$ | $\theta_{cr,max}$, $t_{fr,max}$ |
| 40 | 0,02 | 0,15 | – | – | 1,68 | 0,84 | 0,31 | 6,19 | 3,55 | 1,73 |
| 150 | 0,02 | 1,42 | 0,63 | 0,12 | 6,47 | 3,69 | 1,69 | 18,8 | 12,2 | 6,56 |
| 300 | 0,02 | 2,88 | 1,47 | 0,44 | 10,8 | 6,72 | 3,28 | 26,9 | 19,0 | 11,4 |
| 40 | 0,2 | 1,43 | – | – | 15,8 | 8,17 | 3,05 | 52,5 | 32,7 | 16,8 |
| 150 | 0,2 | 12,2 | 5,95 | 1,12 | 44,3 | 29,6 | 15,3 | 102 | 77,0 | 50,0 |
| 300 | 0,2 | 20,6 | 12,2 | 4,18 | 57,5 | 42,5 | 25,6 | 118 | 94,6 | 68,0 |
| 40 | 2,0 | 12,4 | – | – | 112 | 67,8 | 28,4 | 292 | 217 | 135 |
| 150 | 2,0 | 67,1 | 40,2 | 9,78 | 195 | 150 | 97,8 | 393 | 322 | 242 |
| 300 | 2,0 | 89,1 | 62,8 | 28,9 | 220 | 175 | 125 | 420 | 348 | 273 |

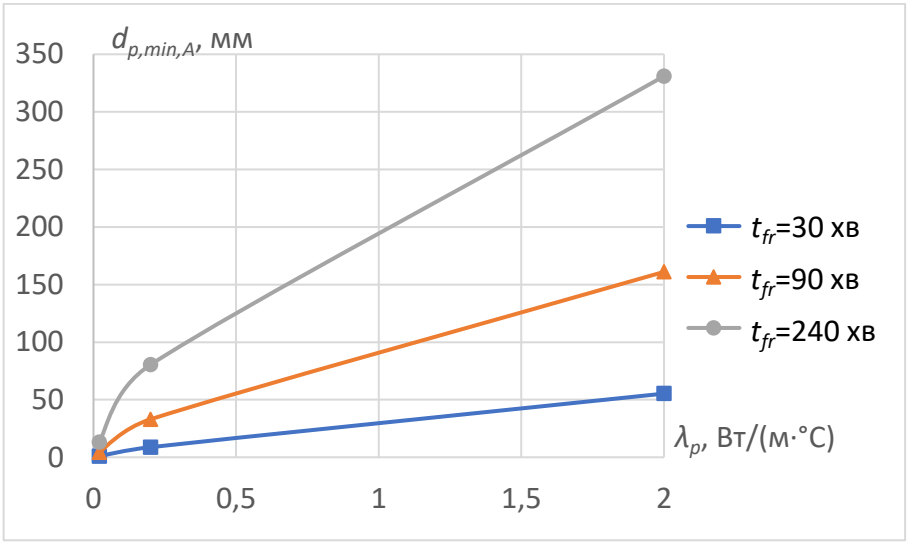
*Джерело:* розроблено авторами




а




б




в

*Рисунок 4* – Залежність товщини $d_{p,min,A}$ від коефіцієнта теплопровідності $\lambda_p$ і коефіцієнта поперечного перерізу (а), критичної температури сталі (б), проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевої колони (в) для $\theta_{cr,med}$ = 500°С, $(A_m/V)_{med}$ = 150 м$^{-1}$, $t_{fr,med}$ = 90 хв

*Джерело:* розроблено авторами

У табл. 5 наведено дані щодо різниці $\Delta_{d,AB}$ між значенням товщини покриття $d_{p,min,A}$ (табл. 2), отриманим для системи $A$, і значенням товщини покриття $d_{p,min,B}$ (табл. 3), отриманим для системи $B$. У цій же таблиці надано дані щодо величини відповідної відносної різниці $\delta_{d,AB}$, яку визначено за такою формулою:

$$\delta_{d,AB} = 100\Delta_{d,AB} / d_{p,min,A}, \quad (11)$$

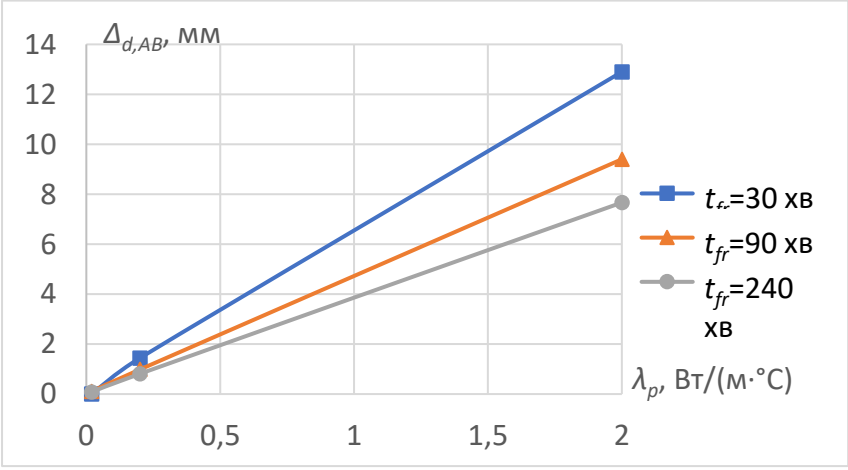
де $\Delta_{d,AB} = d_{p,min,A} - d_{p,min,B}$, мм.

*Таблиця 5* – Дані щодо різниць $\Delta_{d,AB}$ і $\delta_{d,AB}$

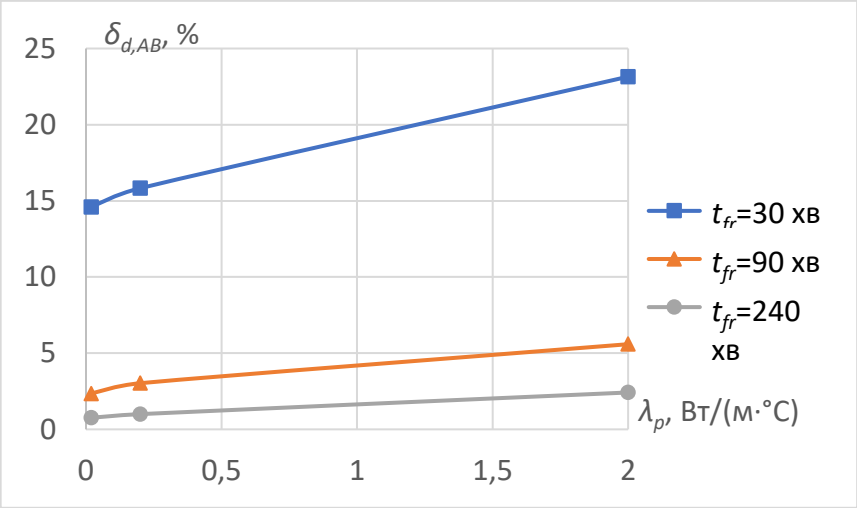
| $A_m/V$, м$^{-1}$ | $\lambda_p$, Вт/(м·°С) | Значення $\Delta_{d,AB}$ (в мм) / $\delta_{d,AB}$ (в %) для: | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $\theta_{cr,min}$, $t_{fr,min}$ | $\theta_{cr,med}$, $t_{fr,min}$ | $\theta_{cr,max}$, $t_{fr,min}$ | $\theta_{cr,min}$, $t_{fr,med}$ | $\theta_{cr,med}$, $t_{fr,med}$ | $\theta_{cr,max}$, $t_{fr,med}$ | $\theta_{cr,min}$, $t_{fr,max}$ | $\theta_{cr,med}$, $t_{fr,max}$ | $\theta_{cr,max}$, $t_{fr,max}$ |
| 40 | 0,02 | 0,17 / 38,6 | – / – | – / – | 0,09 / 4,35 | 0,08 / 7,08 | 0,09 / 18,4 | 0,06 / 0,89 | 0,07 / 1,78 | 0,07 / 3,54 |
| 150 | 0,02 | 0,15 / 7,94 | 0,14 / 14,6 | 0,13 / 44,8 | 0,14 / 1,92 | 0,10 / 2,35 | 0,08 / 4,02 | 0,1 / 0,50 | 0,1 / 0,76 | 0,08 / 1,12 |
| 300 | 0,02 | 0,18 / 4,95 | 0,15 / 7,61 | 0,12 / 17,7 | 0,10 / 0,83 | 0,11 / 1,42 | 0,19 / 4,87 | 0,1 / 0,35 | 0,1 / 0,48 | 0,1 / 0,79 |
| 40 | 0,2 | 1,68 / 39,5 | – / – | – / – | 0,9 / 4,64 | 1 / 9,01 | 0,86 / 17,8 | 0,9 / 1,59 | 0,7 / 1,95 | 0,7 / 3,66 |
| 150 | 0,2 | 1,50 / 9,49 | 1,39 / 15,8 | 1,29 / 46,1 | 1,1 / 2,29 | 1 / 3,03 | 0,9 / 5,06 | 1 / 0,95 | 0,8 / 1,00 | 0,7 / 1,32 |
| 300 | 0,2 | 1,60 / 6,58 | 1,40 / 9,09 | 1,24 / 20,0 | 1,1 / 1,79 | 1,1 / 2,39 | 0,9 / 3,13 | 1 / 0,82 | 0,8 / 0,82 | 0,7 / 0,98 |
| 40 | 2,0 | 15,5 / 43,8 | – / – | – / – | 10 / 7,41 | 8,9 / 10,1 | 8,6 / 19,6 | 8 / 2,57 | 7 / 3,00 | 7 / 4,70 |
| 150 | 2,0 | 13,3 / 15,9 | 12,8 / 23,2 | 11,5 / 51,6 | 10 / 4,81 | 9 / 5,59 | 9,1 / 8,43 | 8 / 1,98 | 8 / 2,42 | 8 / 3,19 |
| 300 | 2,0 | 13,5 / 13,4 | 12,7 / 17,3 | 11,0 / 28,6 | 10 / 4,37 | 10 / 5,43 | 9 / 6,82 | 8 / 1,87 | 8 / 2,25 | 7 / 2,51 |

Із аналізу цієї таблиці випливає, що різниця $\Delta_{d,AB}$ змінюється в діапазоні від 0,06 мм до 15,5 мм. Вона має найбільші значення для $\lambda_{p,max}$ = 2,0 Вт/(м·°С) і $t_{fr,min}$ = 30 хв, найменші – для $\lambda_{p,min}$ = 0,02 Вт/(м·°С) і $t_{fr,max}$ = 240 хв. Значення цієї різниці суттєво залежить від $\lambda_p$ і $t_{fr}$, а її залежність від $A_m/V$ і $\theta_{cr}$ є малою. З підвищенням $\lambda_p$ різниця $\Delta_{d,AB}$ монотонно збільшується, а з підвищенням $t_{fr}$ вона зменшується. Так, з підвищенням $\lambda_p$ від 0,02 Вт/(м·°С) до 2,0 Вт/(м·°С) середнє значення різниці $\Delta_{d,AB}$, визначене для певної величини $t_{fr}$, збільшується: від 0,15 мм до 12,9 мм – для $t_{fr,min}$ = 30 хв; від 0,11 мм до 9,4 мм – для $t_{fr,med}$ = 90 хв; від 0,09 мм до 7,7 мм – для $t_{fr,max}$ = 240 хв (рис. 5а).

Відносна різниця $\delta_{d,AB}$ змінюється в діапазоні від 0,35 % до 51,6 %. Вона має найбільші значення для $\lambda_{p,max}$ = 2,0 Вт/(м·°С) і $t_{fr,min}$ = 30 хв, найменші – для $t_{fr,max}$ = 240 хв. Значення цієї різниці, крім $\lambda_p$ і $t_{fr}$, також залежить від $A_m/V$ і $\theta_{cr}$. Вона збільшується з підвищенням $\lambda_p$, $\theta_{cr}$ і зменшується з підвищенням $A_m/V$ і $t_{fr}$. Вплив $\lambda_p$ на цю різницю не такий значний, як на $\Delta_{d,AB}$. Так, для $(A_m/V)_{med}$ = 150 м$^{-1}$ і $\theta_{cr,med}$ = 500 °С з підвищенням $\lambda_p$ від 0,02 Вт/(м·°С) до 2,0 Вт/(м·°С) відносна різниця збільшується: від 14,6% до 23,2% – для $t_{fr,min}$ = 30 хв; від 2,35% до 5,59% – для $t_{fr,med}$ = 90 хв; від 0,76% до 2,42 % – для $t_{fr,max}$ = 240 хв (рис. 5б). Також, як і $t_{fr}$, на відносну різницю суттєво впливають $A_m/V$ і $\theta_{cr}$. Так, для $t_{fr,min}$ = 30 хв і $\theta_{cr,min}$ = 350 °С з підвищенням $A_m/V$ з 40 м$^{-1}$ до 300 м$^{-1}$ різниця $\delta_{d,AB}$ зменшується: від 38,6% до 4,95% – для $\lambda_{p,min}$ = 0,02 Вт/(м·°С); від 39,5% до 6,58% – для $\lambda_{p,med}$ = 0,2 Вт/(м·°С); від 43,8% до 13,4% – для $\lambda_{p,max}$ = 2,0 Вт/(м·°С) (табл. 5). Для $t_{fr,min}$ = 30 хв і $(A_m/V)_{med}$ = 150 м$^{-1}$ з підвищенням $\theta_{cr}$ з 350 °С до 700 °С різниця $\delta_{d,AB}$ збільшується: від 7,94% до 44,8% – для $\lambda_{p,min}$ = 0,02 Вт/(м·°С); від 9,49% до 46,1% – для $\lambda_{p,med}$ = 0,2 Вт/(м·°С); від 15,9% до 51,6% – для $\lambda_{p,max}$ = 2,0 Вт/(м·°С) (табл. 5). З підвищенням $t_{fr}$ вплив $A_m/V$ і $\theta_{cr}$ на відносну різницю $\delta_{d,AB}$ значно зменшується.




а




б

*Рисунок 5* – Залежність різниць $\Delta_{d,AB}$ (а) і $\delta_{d,AB}$ (б) від коефіцієнта теплопровідності $\lambda_p$ для різних значень проміжку часу $t_{fr}$

*Джерело:* розроблено авторами

У табл. 6 наведено дані щодо різниці $\Delta_{d,BC}$ між значенням товщини покриття $d_{p,min,B}$ (табл. 3), отриманим для системи *B*, і значенням товщини покриття $d_{p,min,C}$ (табл. 4), отриманим для системи *C*. В цій же таблиці надано дані щодо величини відповідної відносної різниці $\delta_{d,BC}$, яку визначено за такою формулою:

$$\delta_{d,BC} = 100\Delta_{d,BC} / d_{p,min,B}, \qquad (13)$$

де $\Delta_{d,BC} = d_{p,min,B} - d_{p,min,C}$, мм

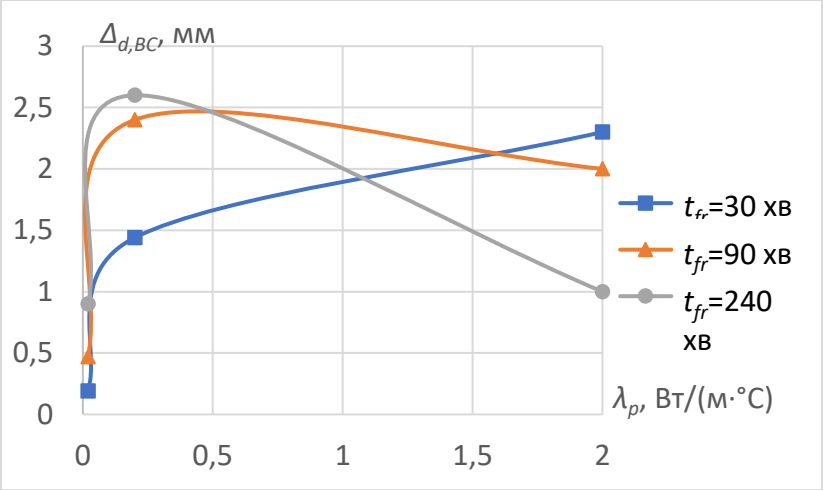
*Таблиця 6* – Дані щодо різниць $\Delta_{d,BC}$ і $\delta_{d,BC}$

| $A_m/V$, м$^{-1}$ | $\lambda_p$, Вт/(м·°С) | Значення $\Delta_{d,BC}$ (в мм) / $\delta_{d,BC}$ (в %) 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 | 0,11 / 43,2 | – / – | – / – | 0,3 / 15,2 | 0,21 / 20,0 | 0,09 / 22,5 | 0,5 / 7,47 | 0,32 / 8,27 | 0,18 / 9,42 |
| 150 | 0,02 | 0,32 / 18,4 | 0,19 / 23,2 | 0,04 / 25,0 | 0,67 / 9,38 | 0,47 / 11,3 | 0,22 / 11,5 | 1,3 / 6,47 | 0,9 / 6,87 | 0,51 / 7,21 |
| 300 | 0,02 | 0,58 / 16,8 | 0,35 / 19,2 | 0,12 / 21,4 | 1,2 / 10,0 | 0,91 / 11,9 | 0,43 / 11,6 | 1,7 / 5,94 | 1,7 / 8,21 | 1,3 / 10,2 |
| 40 | 0,2 | 1,14/ 44,4 | – / – | – / – | 2,7 / 14,6 | 1,93 / 19,1 | 0,92 / 23,2 | 3,1 / 5,58 | 2,5 / 7,10 | 1,6 / 8,70 |
| 150 | 0,2 | 2,1/ 14,7 | 1,44 / 19,5 | 0,39 / 25,8 | 2,7 / 5,74 | 2,4 / 7,50 | 1,6 / 9,47 | 2 / 1,92 | 2,6 / 3,27 | 2,5 / 4,76 |
| 300 | 0,2 | 2,1/ 9,25 | 1,8 / 12,9 | 0,78 / 15,7 | 2,7 / 4,49 | 2,5 / 5,56 | 2,3 / 8,24 | 3 / 2,48 | 2,7 / 2,77 | 2,8 / 3,95 |
| 40 | 2,0 | 7,5/ 37,7 | – / – | – / – | 13 / 10,4 | 11,3 / 14,3 | 6,8 / 19,3 | 11 / 3,63 | 9 / 3,98 | 7 / 4,93 |
| 150 | 2,0 | 3,2/ 4,55 | 2,3 / 5,41 | 1,02 / 9,4 | 3 / 1,52 | 2 / 1,32 | 1,1 / 1,11 | 3 / 0,76 | 1 / 0,31 | 1 / 0,41 |
| 300 | 2,0 | -1,6/ -1,83 | -2,2 / -3,63 | -1,4 / -5,09 | -1 / -0,46 | -1 / -0,57 | -2 / -1,63 | -1 / -0,24 | 0 / 0 | -1 / -0,37 |

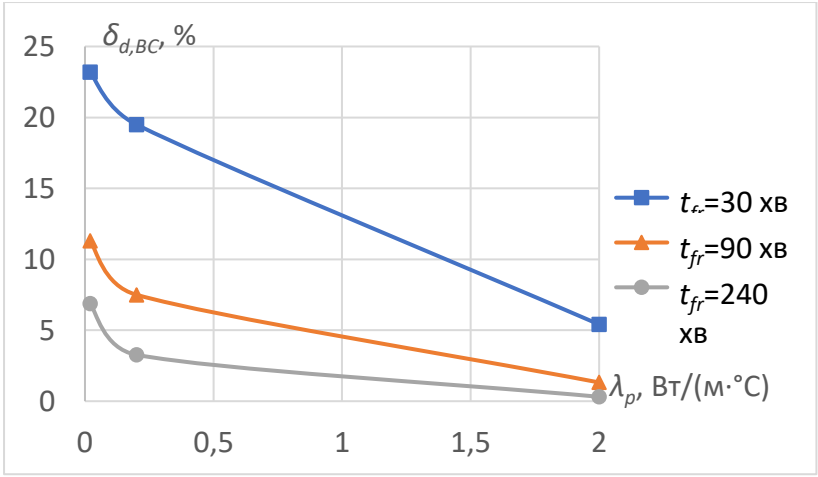
*Джерело:* розроблено авторами

Із аналізу цієї таблиці випливає, що різниця $\Delta_{d,BC}$ змінюється в діапазоні від 2,2 мм до 13 мм. Найбільші значення вона має для $(A_m/V)_{min}$ = 40 м$^{-1}$ і

$\lambda_{p,max}$ = 2,0 Вт/(м·°С), найменші – для $(A_m/V)_{max}$ = 300 м$^{-1}$ і $\lambda_{p,max}$ = 2,0 Вт/(м·°С). Немає монотонної залежності різниці $\Delta_{d,BC}$ від $\lambda_p$ і $t_{fr}$. Приклад цього проілюстровано на рис. 6а. З підвищенням $\lambda_p$ від 0,02 Вт/(м·°С) до 0,2 Вт/(м·°С) різниця $\Delta_{d,BC}$ збільшується: від 0,19 мм до 1,44 мм – для $t_{fr,min}$ = 30 хв; від 0,47 мм до 2,4 мм – для $t_{fr,med}$ = 90 хв; від 0,90 мм до 2,6 мм – для $t_{fr,max}$ = 240 хв. У разі подальшого підвищення $\lambda_p$ до 2,0 Вт/(м·°С) різниця $\Delta_{d,BC}$ для $t_{fr,min}$ = 30 хв збільшується до 2,3 мм, а для $t_{fr,med}$ = 90 хв і $t_{fr,max}$ = 240 хв має місце її зменшення до 2,0 мм і 1,0 мм відповідно. Водночас, якщо для $\lambda_{p,min}$ = 0,02 Вт/(м·°С) і $\lambda_{p,med}$ = 0,2 Вт/(м·°С) з підвищенням $t_{fr}$ різниця $\Delta_{d,BC}$ збільшується, то для $\lambda_{p,max}$ = 2,0 Вт/(м·°С) вона зменшується. Різниця $\Delta_{d,BC}$ зменшується з підвищенням $\theta_{cr}$. З підвищенням $A_m/V$ вона зменшується для $\lambda_{p,max}$ = 2,0 Вт/(м·°С), а для інших $\lambda_p$ – збільшується.




а




б

*Рисунок 6* – Залежність різниць $\Delta_{d,BC}$ (а) і $\delta_{d,BC}$ (б) від коефіцієнта теплопровідності $\lambda_p$ для різних значень проміжку часу $t_{fr}$ *Джерело:* розроблено авторами

Відносна різниця $\delta_{d,BC}$ змінюється в діапазоні від 5,09 % до 44,4 %. Вона має найбільші значення для $(A_m/V)_{min}$ = 40 м$^{-1}$, $t_{fr,min}$ = 30 хв, $\theta_{cr,min}$ = 350 °С, а найменші – для $(A_m/V)_{max}$ = 300 м$^{-1}$ і $\lambda_{p,max}$ = 2,0 Вт/(м·°С). Ця різниця залежить від $\lambda_p$, $A_m/V$ $t_{fr}$ і $\theta_{cr}$. Вона зменшується з підвищенням $\lambda_p$, $A_m/V$, $t_{fr}$ і збільшується з підвищенням $\theta_{cr}$. Так, для $(A_m/V)_{med}$ = 150 м$^{-1}$ і $\theta_{cr,med}$ = 500 °С з підвищенням $\lambda_p$ від 0,02 Вт/(м·°С) до 2,0 Вт/(м·°С) відносна

різниця зменшується: від 23,2% до 5,41% – для $t_{fr,min}$ = 30 хв; від 11,3% до 1,32% – для $t_{fr,med}$ = 90 хв; від 6,87% до 0,31% – для $t_{fr,max}$ = 240 хв (рис. 6б). Для $t_{fr,min}$ = 30 хв і $\theta_{cr,min}$ = 350 °С з підвищенням $A_m/V$ з 40 м$^{-1}$ до 300 м$^{-1}$ різниця $\delta_{d,AB}$ зменшується: від 43,2% до 16,8% – для $\lambda_{p,min}$ = 0,02 Вт/(м·°С); від 44,4% до 9,25% – для $\lambda_{p,med}$ = 0,2 Вт/(м·°С); від 37,7% до 1,83% – для $\lambda_{p,max}$ = 2,0 Вт/(м·°С) (табл. 6). Для $t_{fr,min}$ = 30 хв і $(A_m/V)_{med}$ = 150 м$^{-1}$ з підвищенням $\theta_{cr}$ з 350 °С до 700 °С різниця $\delta_{d,BC}$ збільшується: від 18,4% до 25,0% – для $\lambda_{p,min}$ = 0,02 Вт/(м·°С); від 14,7% до 25,8% – для $\lambda_{p,med}$ = 0,2 Вт/(м·°С); від 4,55% до 9,4% – для $\lambda_{p,max}$ = 2,0 Вт/(м·°С) (табл. 6).

Результати розрахунків необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття на зовнішній поверхні вогнезахисного екрана $d_{p,min,mem}$ для системи $D$ (рис. 3) наведено в табл. 7. У цій же таблиці вказано значення товщини вогнезахисного покриття на поверхні колони $d_{p,col} = 0{,}5d_{p,min,B}$, які застосовували під час цих розрахунків. Згідно з даними цієї таблиці за формулами (14), (15) розраховано необхідну мінімальну товщину вогнезахисту $d_{p,min,D}$ для системи $D$ і дані щодо відносної різниці $\delta_{d,BD}$ між значенням товщини покриття $d_{p,min,B}$ (табл. 3) для системи $B$ і значенням товщини вогнезахисту $d_{p,min,D}$ для системи $D$.

$$d_{p,min,D} = d_{p,min,mem} + d_{p,col}\,; \qquad (14)$$

$$\delta_{d,BD} = 100(d_{p,min,B} - d_{p,min,D}) / d_{p,min,B}\,. \qquad (15)$$

*Таблиця 7* – Результати розрахунків товщини $d_{p,min,mem}$ для системи $D$

| $A_m/V$, м$^{-1}$ | $\lambda_{p,mem}$ Вт/(м·°С) | Товщина $d_{p,col}$ (в мм) / $d_{p,min,mem}$ (в мм) для: | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $\theta_{cr,min}$, $t_{fr,min}$ | $\theta_{cr,med}$, $t_{fr,min}$ | $\theta_{cr,max}$, $t_{fr,min}$ | $\theta_{cr,min}$, $t_{fr,med}$ | $\theta_{cr,med}$, $t_{fr,med}$ | $\theta_{cr,max}$, $t_{fr,med}$ | $\theta_{cr,min}$, $t_{fr,max}$ | $\theta_{cr,med}$, $t_{fr,max}$ | $\theta_{cr,max}$, $t_{fr,max}$ |
| $\lambda_{p,col} = \lambda_{p,min}$ = 0,02 Вт/(м·°С) | | | | | | | | | | |
| 40 | 0,02 | 0,132 / 0,076 | – / – | – / – | 0,99 / 0,872 | 0,525 / 0,439 | 0,2 / 0,163 | 3,345 / 3,100 | 1,935 / 1,80 | 0,955 / 0,890 |
| 150 | 0,02 | 0,87 / 0,71 | 0,41 / 0,324 | 0,08 / 0,056 | 3,57 / 3,11 | 2,08 / 1,79 | 0,955 / 0,834 | 10,05 / 8,93 | 6,55 / 5,74 | 3,535 / 3,19 |
| 300 | 0,02 | 1,73 / 1,37 | 0,91 / 0,73 | 0,28 / 0,202 | 6,0 / 4,99 | 3,815 / 3,17 | 1,855 / 1,61 | 14,3 / 12,7 | 10,35 / 8,87 | 6,35 / 5,35 |
| 40 | 0,2 | 0,132 / 0,75 | – / – | – / – | 0,99 / 8,35 | 0,525 / 4,32 | 0,2 / 1,63 | 3,345 / 27,3 | 1,935 / 17,0 | 0,955 / 8,73 |
| 150 | 0,2 | 0,87 / 6,32 | 0,41 / 3,09 | 0,08 / 0,55 | 3,57 / 23,4 | 2,08 / 15,4 | 0,955 / 7,90 | 10,05 / 53,3 | 6,55 / 41,6 | 3,535 / 27,3 |
| 300 | 0,2 | 1,73 / 10,7 | 0,91 / 6,43 | 0,28 / 1,94 | 6,0 / 30,8 | 3,815 / 22,9 | 1,855 / 13,9 | 14,3 / 64,7 | 10,35 / 53,2 | 6,35 / 38,6 |
| 40 | 2,0 | 0,132 / 6,64 | – / – | – / – | 0,99 / 62,1 | 0,525 / 37,4 | 0,2 / 15,3 | 3,345 / 159 | 1,935 / 122 | 0,955 / 75,0 |
| 150 | 2,0 | 0,87 / 36,6 | 0,41 / 22,3 | 0,08 / 4,92 | 3,57 / 106 | 2,08 / 85,9 | 0,955 / 56,6 | 10,05 / 213 | 6,55 / 186 | 3,535 / 149 |
| 300 | 2,0 | 1,73 / 48,2 | 0,91 / 35,8 | 0,28 / 14,8 | 6,0 / 121 | 3,815 / 103 | 1,855 / 78,1 | 14,3 / 240 | 10,35 / 210 | 6,35 / 173 |
| $\lambda_{p,col} = \lambda_{p,med}$ = 0,2 Вт/(м·°С) | | | | | | | | | | |
| 40 | 0,02 | 1,285 / 0,08 | – / – | – / – | 9,25 / 0,85 | 5,05 / 0,44 | 1,985 / 0,16 | 27,8 / 2,94 | 17,6 / 1,73 | 9,2 / 0,875 |
| 150 | 0,02 | 7,15 / 0,67 | 3,695 / 0,31 | 0,755 / 0,06 | 23,5 / 2,65 | 16,0 / 1,63 | 8,45 / 0,79 | 52,0 / 6,84 | 39,8 / 4,64 | 26,25/ 2,75 |
| 300 | 0,02 | 11,35 / 1,19 | 7,0 / 0,66 | 2,48 / 0,20 | 30,1 / 3,78 | 22,5 / 2,53 | 13,95 / 1,36 | 60,5 / 8,57 | 48,65 / 6,19 | 35,4 / 3,98 |
| 40 | 0,2 | 1,285 / 0,75 | – / – | – / – | 9,25 / 8,13 | 5,05 / 4,32 | 1,985 / 1,61 | 27,8 / 26,4 | 17,6 / 16,5 | 9,2 / 8,62 |
| 150 | 0,2 | 7,15 / 6,06 | 3,695 / 3,00 | 0,755 / 0,55 | 23,5 / 21,7 | 16,0 / 14,5 | 8,45 / 7,57 | 52,0 / 49,8 | 39,8 / 37,5 | 26,25/ 24,5 |
| 300 | 0,2 | 11,35 / 9,89 | 7,0 / 5,99 | 2,48 / 1,93 | 30,1 / 27,9 | 22,5 / 20,7 | 13,95 / 12,2 | 60,5 / 57,7 | 48,65 / 46,2 | 35,4 / 32,9 |

*Продовження таблиці 7*

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 40 | 2,0 | 1,285 / 6,58 | – / – | – / – | 9,25 / 61,6 | 5,05 / 37,2 | 1,985 / 15,2 | 27,8 / 161 | 17,6 / 121 | 9,2 / 74,1 |
| 150 | 2,0 | 7,15 / 36,7 | 3,695 / 22,0 | 0,755 / 4,9 | 23,5 / 110 | 16,0 / 86,0 | 8,45 / 55,6 | 52,0 / 226 | 39,8 / 191 | 26,25/ 148 |
| 300 | 2,0 | 11,35 / 49,4 | 7,0 / 35,5 | 2,48 / 14,9 | 30,1 / 127 | 22,5 / 105 | 13,95 / 75,3 | 60,5 / 249 | 48,65 / 215 | 35,4 / 174 |
| $\lambda_{p,col} = \lambda_{p,max} = 2{,}0$ Вт/(м·°С) | | | | | | | | | | |
| 40 | 0,02 | 9,95 / 0,02 | – / – | – / – | 62,5 / 0,71 | 39,55 / 0,39 | 17,6 / 0,16 | 151,5 / 2,11 | 113 / 1,36 | 71,0 / 0,76 |
| 150 | 0,02 | 35,15 / 0,49 | 21,25 / 0,25 | 5,4 / 0,05 | 99 / 1,52 | 76 / 1,02 | 49,45 / 0,58 | 198 / 3,33 | 161,5 / 2,40 | 121,5/ 1,6 |
| 300 | 0,02 | 43,75 / 0,72 | 30,3 / 0,44 | 13,75 / 0,17 | 109,5 / 1,81 | 87 / 1,27 | 61,5 / 0,80 | 209,5 / 3,69 | 174 / 2,71 | 136 / 1,89 |
| 40 | 0,2 | 9,95 / 0,72 | – / – | – / – | 62,5 / 6,93 | 39,55 / 3,86 | 17,6 / 1,53 | 151,5 / 20,0 | 113 / 13,2 | 71,0 / 7,5 |
| 150 | 0,2 | 35,15 / 4,60 | 21,25 / 2,46 | 5,4 / 0,53 | 99 / 14,1 | 76 / 9,68 | 49,45 / 5,62 | 198 / 30,2 | 161,5 / 22,5 | 121,5/ 15,3 |
| 300 | 0,2 | 43,75 / 6,58 | 30,3 / 4,13 | 13,75 / 1,62 | 109,5 / 16,5 | 87 / 11,9 | 61,5 / 7,67 | 209,5 / 33,0 | 174 / 25,1 | 136 / 17,9 |
| 40 | 2,0 | 9,95 / 6,29 | – / – | – / – | 62,5 / 56,4 | 39,55 / 34,3 | 17,6 / 14,6 | 151,5 / 145 | 113 / 107 | 71,0 / /67,0 |
| 150 | 2,0 | 35,15 / 32,0 | 21,25 / 19,4 | 5,4 / 4,70 | 99,0 / 93,3 | 76,0 / 71,6 | 49,45 / 46,3 | 198 / 190 | 161,5 / 157 | 121,5/ 118 |
| 300 | 2,0 | 43,75 / 41,5 | 30,3 / 29,3 | 13,75 / 13,1 | 109,5 / 104 | 87,0 / 83,2 | 61,5 / 58,9 | 209,5 / 202 | 174 / 169 | 136 / 132 |

*Джерело:* розроблено авторами

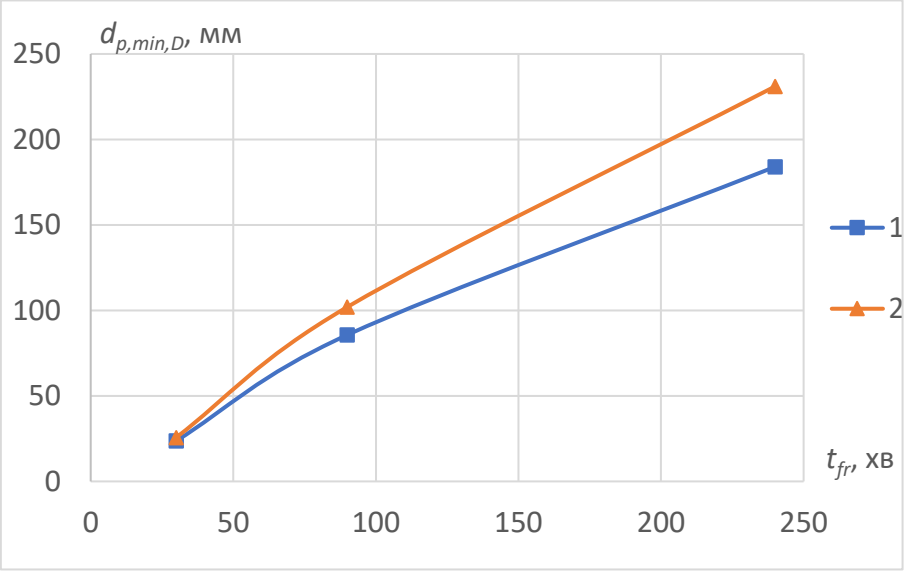



*Рисунок 7* – Залежність товщини $d_{p,min,D}$ від проміжку часу $t_{fr}$ для: 1 – $\lambda_{p,mem} = 0{,}2$ Вт/(м·°С) і $\lambda_{p,col} = 2{,}0$ Вт/(м·°С); 2 – $\lambda_{p,mem} = 2{,}0$ Вт/(м·°С) і $\lambda_{p,col} = 0{,}2$ Вт/(м·°С)

*Джерело:* розроблено авторами

Відносна різниця $\delta_{d,BD}$ змінюється в діапазоні: від 3 876 % до 21 % – для $\lambda_{p,col} = 0{,}02$ Вт/(м·°С); від –352 % до 47 % – для $\lambda_{p,col} = 0{,}2$ Вт/(м·°С); від 1 % до 50 % – для $\lambda_{p,col} = 2{,}0$ Вт/(м·°С). Значення цієї різниці суттєво залежить від комбінації $\lambda_{p,mem}$ і $\lambda_{p,col}$. На рис. 8 для $(A_m/V)_{med} = 150$ м$^{-1}$, $\theta_{cr,med} = 500$ °С, $t_{fr,med} = 90$ хв наведено залежність різниці $\delta_{d,BD}$ від $\lambda_{p,mem}$ для різних значень $\lambda_{p,col}$.

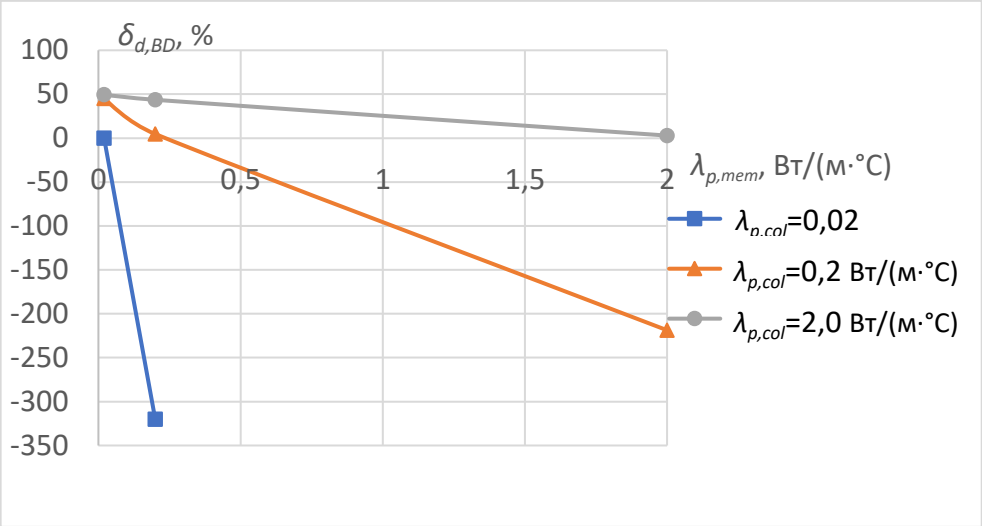



*Рисунок 8* – Залежність різниці $\delta_{d,BD}$ від коефіцієнта теплопровідності $\lambda_{p,mem}$ для різних значень $\lambda_{p,col}$

*Джерело:* розроблено авторами

За абсолютною величиною $\delta_{d,BD}$ має найменші значення для таких комбінацій: $\lambda_{p,mem} = \lambda_{p,col} = 0{,}02$ Вт/(м·°С) (значення $\delta_{d,BD}$ від 3 % до 21 %); $\lambda_{p,mem} = \lambda_{p,col} = 0{,}2$ Вт/(м·°С) (значення $\delta_{d,BD}$ від 2% до 21%); $\lambda_{p,mem} = \lambda_{p,col} = 2{,}0$ Вт/(м·°С) (значення $\delta_{d,BD}$ від 1% до 18%). На рис. 9 для $\lambda_{p,mem} = \lambda_{p,col}$, $(A_m/V)_{med} = 150$ м$^{-1}$ і $\theta_{cr,med}$ = 500 °С наведено залежність $\delta_{d,BD}$ від $\lambda_{p,mem}$ для різних значень $t_{fr}$. Найбільші значення за абсолютною величиною $\delta_{d,BD}$ має для комбінації $\lambda_{p,mem}$ = 2,0 Вт/(м·°С) і $\lambda_{p,col}$ = 0,02 Вт/(м·°С) (значення $\delta_{d,BD}$ від 789 % до 3 876%). Також значення різниці $\delta_{d,BD}$ залежить від $A_m/V$, $t_{fr}$ і $\theta_{cr}$.

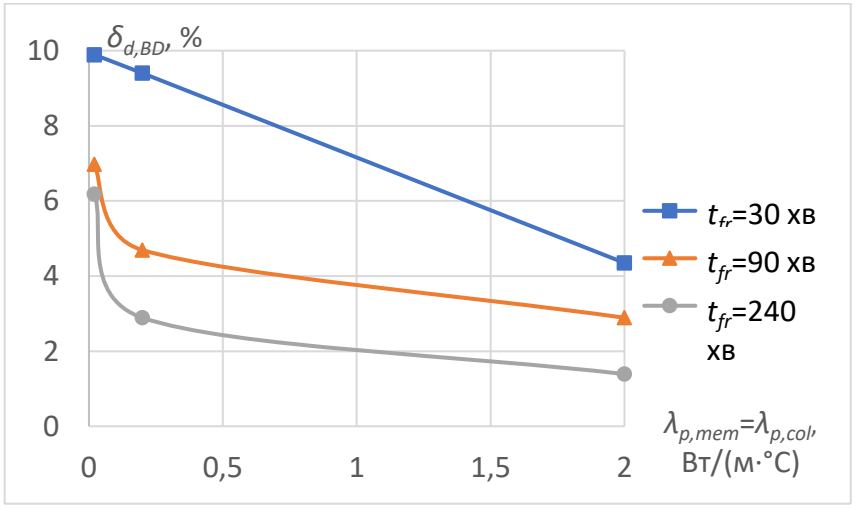



*Рисунок 9* – Залежність різниці $\delta_{d,BD}$ від коефіцієнта теплопровідності $\lambda_{p,mem} = \lambda_{p,col}$ для різних значень проміжку часу $t_{fr}$

*Джерело:* розроблено авторами

Слід зауважити, що дані щодо товщини вогнезахисту $d_{p,min,D}$ для системи $D$, яка складається із вогнезахисного покриття на поверхні колони і

вогнезахисного екрана із вогнезахисним покриттям на його зовнішній поверхні (рис. 3), було отримано для варіантів, коли товщина вогнезахисного покриття на поверхні колони $d_{p,col}$ становить 50% від товщини $d_{p,min,B}$ (табл. 3), за якої виконується вимога (1) і немає необхідності у використанні вогнезахисного покриття на зовнішній поверхні екрана (тобто $d_{p,min,mem} = 0$). Якщо співвідношення між $d_{p,col}$ і $d_{p,min,B}$ змінити з 50% на інші величини, то і значення товщини вогнезахисту $d_{p,min,D}$ будуть отримані інші, і вони можуть бути меншими або більшими за ті, які отримані за $d_{p,col} = 0{,}5d_{p,min,B}$. Так, якщо розглядати варіанти, за якими на поверхні колони немає вогнезахисного покриття, то для них співвідношення $d_{p,col} / d_{p,min,D}$ дорівнює нулю і товщина $d_{p,min,D}$ відповідає товщині $d_{p,min,C}$. Для інших варіантів, якщо немає вогнезахисного покриття на поверхні екрану, $d_{p,min,D} = d_{p,min,B}$. На рис. 10, як приклад, для $(A_m/V)_{med} = 150$ м$^{-1}$, $t_{fr,med} = 90$ хв і $\theta_{cr,med} = 500$ °С наведено залежність товщини вогнезахисту $d_{p,min,D}$ від співвідношення між $d_{p,col}$ і $d_{p,min,D}$ для різних комбінацій $\lambda_{p,mem} = \lambda_{p,col}$. Для комбінаціїй $\lambda_{p,mem} = \lambda_{p,col} = 0{,}02$ Вт/(м·°С) і $\lambda_{p,mem} = \lambda_{p,col} = 0{,}2$ Вт/(м·°С) залежність товщини вогнезахисту $d_{p,min,D}$ від співвідношення $d_{p,col} / d_{p,min,D}$ має монотонно зростаючий характер. З підвищенням $100d_{p,col}/d_{p,min,D}$ від 0 до 100 % товщина $d_{p,min,D}$ збільшується від 3,69 мм до 4,16 мм – для $\lambda_{p,mem} = \lambda_{p,col}$ 0,02 Вт/(м·°С), і від 29,6 мм до 32,0 мм – для $\lambda_{p,mem} = \lambda_{p,col} =$ 0,2 Вт/(м·°С). Така залежність зумовлена зменшенням рівня температури на внутрішній поверхні екрана з підвищенням товщини вогнезахисного покриття на ньому порівняно з варіантами, для яких цього покриття немає. Тепловий опір повітряного проміжку між екраном і колоною збільшується зі зменшенням рівня температури в ньому. Для комбінаціїї $\lambda_{p,mem} = \lambda_{p,col} = 2{,}0$ Вт/(м·°С) з підвищенням $100d_{p,col}/d_{p,min,D}$ від 0 до 51,5 % товщина $d_{p,min,D}$ зменшується від 150 мм до 147 мм, а у разі подальшого підвищення цього співвідношення до 100 % – збільшується до 152 мм. Найменше значення товщини $d_{p,min,D} =$ 147 мм для цієї комбінації зумовлено збільшенням рівня теплового опору повітряного проміжку між екраном і колоною порівняно з варіантами, для яких вогнезахисного покриття немає на поверхні колони або на зовнішній поверхні екрана.

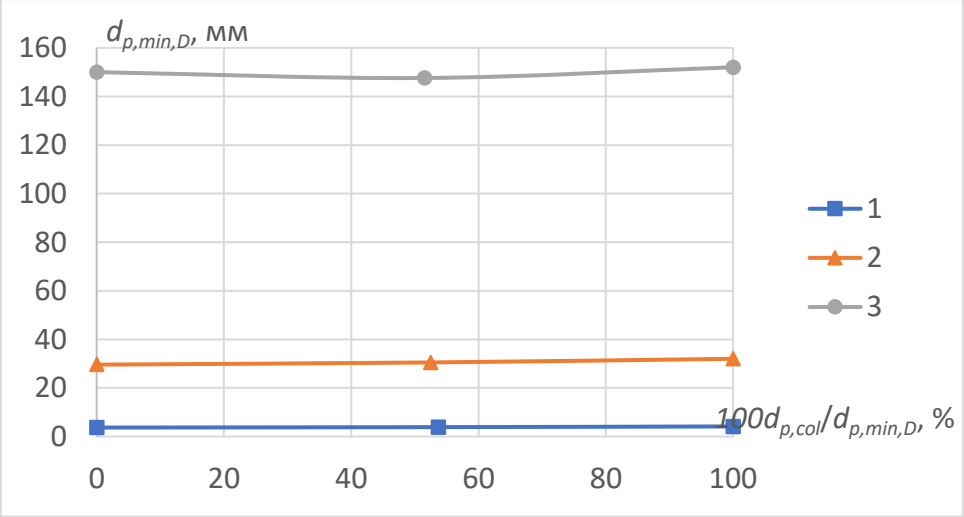



*Рисунок 10* – Залежність товщини вогнезахисту $d_{p,min,D}$ від співвідношення між $d_{p,col}$ і $d_{p,min,D}$ для різних комбінацій $\lambda_{p,mem} = \lambda_{p,col}$: 1 – $\lambda_{p,mem} = \lambda_{p,col} = 0{,}02$ Вт/(м·°С); 2 – $\lambda_{p,mem} = \lambda_{p,col} = 0{,}2$ Вт/(м·°С); 3 – $\lambda_{p,mem} = \lambda_{p,col} = 2{,}0$ Вт/(м·°С)

*Джерело:* розроблено авторами

Отримані дані щодо необхідної мінімальної товщини вогнезахисту для сталевих колон із різними системами вогнезахисту (рис. 3) дають змогу стверджувати таке:

- у разі застосування для сталевих колон систем вогнезахисту з вогнезахисним екраном, як випливає з отриманих результатів (табл. 2–5, 7, рис. 4–5), закономірним є підвищення тривалості досягнення критичної температури сталі й зменшення необхідної мінімальної товщини вогнезахисту порівняно із системами без екрана. Це зумовлено зниженням швидкості підвищення температури сталі через наявність теплового опору повітряного проміжку між екраном і колоною;

- ефективність систем вогнезахисту з вогнезахисним екраном порівняно із системами без нього найбільша для малих значень коефіцієнта поперечного перерізу $(A_m/V)_{min}$ і проміжку часу збереженості вогнестійкості $t_{fr,min}$ (табл. 5, 6, рис. 5, 6). За цими параметрами величина необхідної мінімальної товщини вогнезахисту є найбільш зменшеною порівняно із системами без екрана. Це зумовлено збільшенням рівня теплового опору повітряного проміжку між екраном і колоною порівняно із варіантами, в яких застосовано більші значення цих параметрів;

- ефективність системи вогнезахисту, яка складається із вогнезахисного покриття на поверхні колони і вогнезахисного екрана із вогнезахисним покриттям на його зовнішній поверхні, залежить від значень коефіцієнтів теплопровідності $\lambda_{p,mem}$ і $\lambda_{p,col}$, коефіцієнта поперечного перерізу $A_m/V$, критичної температури $\theta_{cr}$ та проміжку часу збереженості вогнестійкості $t_{fr}$. Застосування вогнезахисного матеріалу з коефіцієнтом теплопровідності 2,0 Вт/(м·°С) на поверхні колони і екрана дає змогу зменшити значення необхідної мінімальної товщини вогнезахисту порівняно із системами, для яких вогнезахисного покриття немає на поверхні колони або на поверхні екрана. Це спричинено збільшенням рівня теплового опору повітряного проміжку між екраном і колоною порівняно з іншими системами.

Зазначені висновки можуть вважатися за доцільні з практичного погляду, тому що дають можливість обґрунтовано підходити до визначення параметрів складових систем вогнезахисту сталевих колон. З теоретичного погляду, вони дають змогу стверджувати про визначеність впливу теплофізичних властивостей вогнезахисних матеріалів на тепловий стан сталевих колон за стандартного температурного режиму, що є певними перевагами проведеного дослідження. Однак варто зауважити, що результати дослідження отримані для систем вогнезахисту, для яких передбачаються вогнезахисні матеріали, що мають сталі, незалежні від температури значення коефіцієнта теплопровідності, а також певну величину питомої теплоємності $c_p = 1000$ Дж/(кг·°С) і густини $\rho_p = 500$ кг/м$^3$. Насправді, значення коефіцієнта теплопровідності пасивних і реактивних вогнезахисних матеріалів залежать від низки параметрів, зокрема від температури, а їх густина змінюється в широкому діапазоні [8]. Крім того, результати дослідження отримані для умови, що площі поверхні колони, вогнезахисного покриття і вогнезахисного екрана є однаковими. Фактично площа обігрівної поверхні вогнезахисного покриття, зокрема на екрані, може бути значно більшою за площу поверхні колони. Зазначене може призвести до наявності відмінностей в отриманих результатах.

Така невизначеність накладає певні обмеження на використання отриманих результатів, що може трактуватися, як недоліки цього дослідження. Неможливість зняти зазначені обмеження в рамках цього дослідження зумовлює потенційно цікавий напрям подальших наукових розвідок. Вони, зокрема, можуть бути орієнтовані на виявлення залежностей необхідної мінімальної товщини систем вогнезахисту, в яких застосовуються вогнезахисні матеріали зі змінним коефіцієнтом

теплопровідності і різною густиною, від коефіцієнта поперечного перерізу, проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих колон і критичної температури сталі, що враховують змінність площі поверхні різних компонентів цих систем. Це дасть можливість визначити оптимальні параметри систем вогнезахисту для сталевих колон, прийнятні для забезпечення їхньої вогнестійкості в широкому діапазоні тривалості вогневого впливу за стандартного температурного режиму.

**Висновки та напрями подальших досліджень.** З огляду на проведене дослідження визначено дані щодо необхідної мінімальної товщини вогнезахисту $d_{p,min}$ для сталевих колон із різними системами вогнезахисту. Встановлено, що значення цієї товщини як для систем із вогнезахисним екраном, так і без нього, суттєво залежить від коефіцієнта теплопровідності застосованих вогнезахисних матеріалів $\lambda_p$, коефіцієнта поперечного перерізу $A_m/V$, критичної температури сталі $\theta_{cr}$ і проміжку часу збереженості вогнестійкості $t_{fr}$. З підвищенням $\lambda_p$, $A_m/V$, $t_{fr}$ і зменшенням $\theta_{cr}$ товщина $d_{p,min}$ збільшується.

Встановлено, що у разі застосування для сталевих колон систем вогнезахисту з вогнезахисним екраном закономірним є зменшення товщини вогнезахисту $d_{p,min}$ порівняно із системами без екрана. Абсолютна різниця $\Delta_{d,AB}$ і відносна різниця $\delta_{d,AB}$ між значенням товщини покриття, отриманим для системи без вогнезахисного екрана, і значенням товщини покриття, отриманим для системи з вогнезахисним екраном без вогнезахисного покриття на його поверхні, змінюються в діапазонах від 0,06 мм до 15,5 мм і від 0,35% до 51,6% відповідно. Ці різниці мають найбільші значення для $\lambda_{p,max}$ = 2,0 Вт/(м·°С) і $t_{fr,min}$ = 30 хв, найменші – для $t_{fr,max}$ = 240 хв. Значення різниці $\Delta_{d,AB}$ суттєво залежить від $\lambda_p$ і $t_{fr}$, а її залежність від $A_m/V$ і $\theta_{cr}$ є малою. З підвищенням $\lambda_p$ різниця $\Delta_{d,AB}$ монотонно збільшується, а з підвищенням $t_{fr}$ вона зменшується. Величина відносної різниці $\delta_{d,AB}$, крім $\lambda_p$ і $t_{fr}$, також залежить від $A_m/V$ і $\theta_{cr}$. Вона збільшується з підвищенням $\lambda_p$, $\theta_{cr}$ і зменшується з підвищенням $A_m/V$ і $t_{fr}$.

Встановлено, що для систем вогнезахисту з екраном і вогнезахисним покриттям на його поверхні та/або на поверхні колони величина необхідної мінімальної товщини вогнезахисту є найбільш зменшеною порівняно із системами без екрана для малих значень коефіцієнта поперечного перерізу $(A_m/V)_{min}$ і проміжку часу збереженості вогнестійкості $t_{fr,min}$. Ефективність системи вогнезахисту (рівень зменшення товщини вогнезахисту порівняно із системою без екрана), яка складається із вогнезахисного покриття на поверхні колони і вогнезахисного екрана із вогнезахисним покриттям на його зовнішній поверхні, суттєво залежить від значень коефіцієнтів теплопровідності покриття екрана і колони ($\lambda_{p,mem}$, $\lambda_{p,col}$), коефіцієнта поперечного перерізу $A_m/V$, критичної температури $\theta_{cr}$ і проміжку часу збереженості вогнестійкості $t_{fr}$.

Визначено напрями подальших досліджень, котрі орієнтовані на виявлення залежностей необхідної мінімальної товщини систем вогнезахисту, в яких застосовуються вогнезахисні матеріали зі змінним коефіцієнтом теплопровідності і різною густиною, від коефіцієнта поперечного перерізу, проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих колон і критичної температури сталі, що враховують змінність площі поверхні різних компонентів цих систем.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. EN 13501-2:2016 Fire classification of construction products and building elements. Part 2 : Classification using data from fire resistance tests, excluding ventilation services. Cen-Cenelec Management Centre : Rue de la Science 23, B-1040 Brussels. 2016 CEN. 79 p.
2. 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.

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 13381-2:2014 Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Part 2 : Vertical protective membranes. European Committee for Standardization. Management Centre : Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2013 CEN. 35 p.
6. Novak S., Drizhd V., Dobrostan O. Thermal state of steel structures with a combined fire protection system under conditions of fire exposure. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 3/10 (105). P. 17–25.
7. Новак С., Дрідж В., Добростан О. Вплив параметрів системи вогнезахисту на вогнестійкість сталевих конструкцій. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2021. № 1(11). С. 64–74.
8. 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.
9. Qian-Yi Song, Lin-Hai Han 1, Kan Zhou1 and Yuan Feng. Temperature distribution of CFST columns protected by intumescent fire coating. *Ninth International Conference on Advances in Steel Structures (ICASS'2018);* 5–7 December 2018, Hong Kong, China. 2018. P. 1437–1448. Doi :10.18057/icass2018. p. 164.
10. Silva D, Bilotta A., Nigro E. Effect of the thermal input on the behavior of intumescent coatings. *Applications of Structural Fire Engineering (ASFE 2017);* 7–8 September 2017, Manchester, UK. P. 351–360.
11. Silva D., A. Bilotta A., Nigro E. Analisi del comportamento di vernici intumescenti per la protezione al fuoco delle strutture in acciaio. Accettato per la pubblicazione negli atti della conferenza : *XXVI Giornate Italiane Della Costruzione In Acciaio ;* 28–30 Settembre 2017.
12. Bilotta A., Silva D., Nigro E. Tests on intumescent paints for fire protection of existing steel structures. *Construction and Building Materials.* 2016. Vol. 121. P. 410–422.
13. Bilotta A., Silva D., Nigro E. General approach for the assessment of the fire vulnerability of existing steel and composite steel concrete structures. *Journal of Building Engineering*. 2016. Vol. 8. P. 198–207.
14. EN 1992-1-2:2004 Eurocode 2 : Design of concrete structures. Part 1–2 : General rules – Structural fire design. *European committee for standardization.* Central ecretariat : rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2004 CEN. 97 p.
15. Bebawy Mena. Effective fire protection measures for field deployment of FRP strengthened concrete beams (2012). *Electronic Theses and Dissertations.* 2012. 401 P. URL : http://scholar.uwindsor.ca/etd (last accessed : 05.05.2022).
16. EN 1991-1-2:2002/AC:2013 Eurocode 1 : Actions on structures. Part 1–2 : General actions – Actions on structures exposed to fire. European Committee for Standardization. Central ecretariat : rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2004 CEN. 61 p.
17. ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016 Проектування сталевих конструкцій. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість. [Чинний від 2017-04-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2016. 111 с.
18. Круковский П. Г. Обратные задачи тепломассопереноса (общий инженерный подход) : монографія. Київ : Інститут технічної теплофізики НАН України, 1996. 218 с.

## REFERENCES

1. EN 13501-2:2016. Fire classification of construction products and building elements – Part 2 : Classification using data from fire resistance tests, excluding ventilation services. Cen-Cenelec Management Centre : Rue de la Science 23, B-1040 Brussels. 2016 CEN. 79 p. [in English].
2. EN 1993-1-2:2005. Eurocode 3 : Design of steel structures . Part 1–2 : General rules – Structural fire design. European Committee for Standardization. Central Secretariat : rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2005 CEN. 78 p. [in English].
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. [in English].
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. [in English].
5. EN 13381-2:2014 Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Part 2 : Vertical protective membranes. European Committee for Standardization. Management Centre : Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2013 CEN. 35 p. [in English].
6. Novak, S., Drizhd, V., Dobrostan, O. (2020). Thermal state of steel structures with a combined fire protection system under conditions of fire exposure. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Vol. 3/10 (105). P. 17–25. [in English].
7. Novak, S. V., Drizhd, V. L, Dobrostan, O. V. (2021). Vplyv parametriv systemy vognezaxystu na vognestijkist stalevyh konstrukcij. [Influence of fire protection system parameters on fire resistance of steel structures]. Naukovyi visnyk : Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka. 2021. № 1(11). S. 64–74. [In Ukrainian].
8. 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. 2021. Vol. 123. P. 103361. Doi : https://doi: 10.1016/j.firesaf.2021.103361. [in English].
9. Qian-Yi Song, Lin-Hai Han 1, Kan Zhou1 and Yuan Feng. (2018). Temperature distribution of CFST columns protected by intumescent fire coating. Ninth International Conference on Advances in Steel Structures (ICASS'2018) 5–7 December 2018 – Hong Kong, China. 2018. P. 1437–1448. Doi : https://doi: 10.18057/icass2018. p.164. [in English].
10. Silva, D., Bilotta, A., Nigro, E. (2017). Effect of the thermal input on the behavior of intumescent coatings. ASFE 2017 – Applications of Structural Fire Engineering, 7–8 September 2017, Manchester, UK. p. 351–360. [in English].
11. Silva, D., A. Bilotta, A., Nigro, E. (2017). Analisi del comportamento di vernici intumescenti per la protezione al fuoco delle strutture in acciaio. Accettato per la pubblicazione negli atti della conferenza : XXVI Giornate Italiane della costruzione in acciaio 28–30 Settembre 2017. [in English].
12. Bilotta, A., Silva, D., Nigro, E. (2016). Tests on intumescent paints for fire protection of existing steel structures. Construction and Building Materials. 2016. Vol. 121. p. 410–422. [in English].

13. Bilotta, A., Silva, D., Nigro, E. (2016). General approach for the assessment of the fire vulnerability of existing steel and composite steel concrete structures. Journal of Building Engineering. 2016. Vol. 8. p. 198–207. [in English].
14. EN 1992-1-2:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1–2 : General rules – Structural fire design. European Committee for Standardization. Central ecretariat : rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2004 CEN. 97 p. [in English].
15. Bebawy Mena. (2012). Effective fire protection measures for field deployment of FRP strengthened concrete beams (2012). Electronic Theses and Dissertations. 2012. 401 P. http://scholar.uwindsor.ca/etd. [in English].
16. EN 1991-1-2:2002/AC:2013. Eurocode 1 : Actions on structures. Part 1–2 : General actions – Actions on structures exposed to fire. European Committee for Standardization. Central ecretariat : rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2004 CEN. 61 p. [in English].
17. DSTU-N B V.2.6-211:2016. Proektuvannia stalevykh konstruktsii. Rozrakhunok konstruktsii na vohnestiikist [Design of steel structures. Calculation of structures for fire resistance]. Kyiv : Minrehion Ukrainy, 2016. 111 s. [in Ukrainian].
18. Krukovskyi P.G. Obratnyye zadachi teplomassoperenosa (obshchiy inzhenernyy podkhod) [Inverse problems of heat and mass transfer (general engineering approach)] : monohrafiia. Kyiv : Instytut tekhnichnoi teplofizyky NAN Ukrainy. 1996. 218 s. [in Russian].

# INFLUENCE OF THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF FIRE-RETARDANT MATERIALS ON THE THERMAL STATE OF STEEL COLUMNS UNDER STANDARD TEMPERATURE REGIME

*S. Novak[1], V. Drizhd[2], O. Dobrostan[1], M. Novak*
*[1]Institute of Public Administration and Research in Civil Protection, Ukraine*
*[2] L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic Chemistry and Coal Chemistry, Ukraine*

KEYWORDS:

fire-retardant material; thermal conductivity; critical temperature of steel; minimal required thickness, steel column, standard fire scenario, thermophysical properties

ANNOTATION

Given the need to optimize the parameters of fire-retardant systems for building structures for further improvement and development of their technology, a study aimed at determining the impact of thermophysical properties of fire-retardant materials, which are components of such systems, on thermal state of steel columns at standard fire scenario is required. The objective of current study was to determine the relationships between the required minimal thickness of fire-retardant systems, thermophysical properties of fire-retardant materials that are part of such systems, critical steel temperature, cross-sectional factor and time of fire resistance for steel columns. To achieve this goal, the required minimal thicknesses of fire-retardant coatings for the studied fire-retardant systems were determined, the calculated data were summarized and the dependences of this thickness on the thermophysical properties of fire-retardant materials and other parameters of the systems were identified. It was established that the thickness value, both for systems with and without fire screen, significantly depends on thermal conductivity $\lambda_p$ of applied fire-retardant materials, cross-sectional factor $A_m/V$, critical temperature $\theta_{cr}$ and fire resistance time limit $t_{fr}$. With the increase in $\lambda_p$, $A_m/V$, $t_{fr}$ and decrease in $\theta_{cr}$ the required value of thickness $d_{p,min}$ rises. It was shown that when fire-retardant systems with a screen are used for steel columns, there is a reduction in the required thickness of fire protection $d_{p,min}$ compared to the system without a screen. The absolute difference $\Delta_{d,AB}$ and the relative difference $\delta_{d,AB}$ between the value of the fire-retardant system thickness obtained for a system without fire screen and the value obtained for a system with a screen without a fire-retardant coating on its surface, varies in the range from 0.06 mm to 15.5 mm and from 0.35% to 51.6%, respectively. For fire-retardant systems with screen and fire-retardant coating on its surface and (or) on the surface of the column, the required minimum thickness of the system for small values of cross-sectional factor $(A_m/V)_{min}$ and short fire resistance time intervals $t_{fr,min}$ is lesser, compared to those without screen. Data was obtained regarding the difference between the values of the required minimal thickness of fire protection for systems with fire-retardant coating on the outer surface of the screen and without it.

# Науковий вісник:
## Цивільний захист та пожежна безпека

науковий журнал
ISSN 2518-1777

Підписано до друку 27.06.2022
Формат 60х90/8
Обл. вид. арк. –
Друк цифровий. Замовлення №___
Віддруковано згідно з наданим орігінал-макетом
ТОВ «Про формат»
Україна, 04080, м. Київ, вул. Кирилівська, 86
Реєстраційне свідоцтво ДК № 5942 від 11 січня 2018 р.
Тир. 50 прим.