



НАУКОВИЙ ВІСНИК: Цивільний захист та пожежна безпека

№ 2 (16), 2023

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

ISSN 2518-1777

Редакційна колегія:

головний редактор –
голова редколегії
д-р техн. наук

Пруський А. В.

заступник
головного редактора
д-р техн. наук
відповідальний секретар
канд. техн. наук

Поздєєв С. В.

Огурцов С. Ю.

д-р техн. наук
д-р техн. наук
д-р техн. наук
д-р техн. наук
д-р техн. наук
д-р техн. наук
канд. техн. наук
канд. техн. наук
канд. техн. наук
канд. техн. наук
канд. техн. наук
канд. техн. наук
канд. техн. наук
канд. хім. наук
PhDEng.
PhDEng.

Тютюник В. В.
Цапко Ю. В.
Ніжник В. В.
Єременко С. А.
Жартовський С. В.
Чумаченко С. М.
Яковчук Р. С.
Коваленко В. В.
Лоїк В. Б.
Лавренюк О. І.
Новак С. В.
Пазен О. Ю.
Нуянзін О. М.
Паснак І. В.
Сізіков О. О.
Ліхнівський Р. В.
Врублевський Д.
Самберг А.

Літературні
редактори:

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

Випусковий редактор

Борисова А. С.

Адреса редакції:

04074, м. Київ, вул. Вишгородська, 21

Телефони:

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

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

e-mail: niv1966@ukr.net

Заснований у 2016 році

Виходить 2 рази на рік

Засновник

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

Видавець

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

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

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

261 «Пожежна безпека»

263 «Цивільний захист»

Наказ Міністерства освіти і науки України від
02.07.2020 № 886

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

Рекомендовано до видання рішенням

Вченої ради ІДУ НД ЦЗ

Протокол від 01.12.2023 № 10

Ідентифікатор випуску DOI:

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2>

Підписано до друку 01.12.2023

Формат 60 × 84/8

Наклад 50 прим.

ЗМІСТ

- С. Новак, О. Добростан, М. Пустовий**
Визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості несучих сталевих конструкцій з різною початковою температурою **4**
- В. Хижняк, В. Шевченко**
Вибір та обґрунтування критеріїв ефективності застосування безпілотних авіаційних систем в операціях із ліквідації пожеж в екологічних системах **22**
- А. Гаврилюк, Р. Яковчук**
Методика експериментальних досліджень поведінки літій-іонних батарей під дією відкритого полум'я **32**
- Н. Козяр, О. Кириченко, В. Ковбаса, О. Дядюшенко, В. Ващенко, С. Колінько**
Визначення критичних значень параметрів зовнішніх термічних впливів на піротехнічні вироби на основі нітратно-металевих сумішей в умовах їх зберігання та транспортування **42**
- В. Тютюник, О. Тютюник, Д. Усачов**
Особливості створення системи акустичного моніторингу джерел надзвичайних ситуацій у контексті розвитку концепції «Smart city» **58**
- В. Бенедюк, А. Онищук, О. Тимошенко, П. Іллюченко, В. Коваленко**
Натурні експериментальні дослідження екранувальної здатності суцільних водяних завіс від проникнення потоку теплового випромінювання та диму **77**
- С. Новак, М. Новак, М. Пустовий**
Вплив відхилю температури в печі від номінального режиму на результати випробування сталевих конструкцій на вогнестійкість **88**

CONTENTS

- S. Novak, O. Dobrostan, M. Pustovyi**
Determination of the time period of preservation of fire resistance of load-bearing steel structures with different initial temperatures **4**
- V. Khizhnyak, V. Shevchenko**
Selection and justification of criteria for the effectiveness of the use of unmanned aerial systems in firefighting operations in ecological systems **22**
- A. Gavryliuk, R. Yakovchuk**
Methods of experimental research behavior of lithium-ion batteries under the influence of open flame **32**
- N. Koziar, O. Kyrychenko, V. Kovbasa, O. Diadiushenko, V. Vaschenko, S. Kolinko**
Determination of critical values of parameters of external thermal effects on pyrotechnic products based on nitrate-metal mixtures in the conditions of their storage and transportation **42**
- V. Tiutiunyk, O. Tiutiunyk, D. Usachov**
Features of creating a system of acoustic monitoring of emergency sources in the context of the development of the smart city concept **58**
- V. Benediuk, A. Onyshchuk, O. Tymoshenko, P. Illiuchenko, V. Kovalenko**
Conduction of natural experimental research on the shielding capacity of continuous water curtains against the penetration of heat radiation flow and smoke **77**
- S. Novak, M. Novak, M. Pustovyi**
The influence of temperature deviation in the furnace from the nominal regime on the results of testing steel structures for fire resistance **88**

- | | | | |
|--|-------------------|---|-------------------|
| <p>В. Бенедюк, А. Онищук, О. Тимошенко, П. Ілляченко
Дослідження впливу конструктивних елементів проточної частини зрошувача систем пожежогасіння на його витратні характеристики</p> | <p>105</p> | <p>V. Benediuk, A. Onyshchuk, O. Tymoshenko, P. Illiuchenko
Research of the influence of constructive elements of flow part of the irrigator of firefighting system on it's consumption characteristics</p> | <p>105</p> |
| <p>М. Новак, О. Харкянен
Валідація методів визначення теплових показників систем вогнезахисту сталевих конструкцій</p> | <p>113</p> | <p>M. Novak, O. Kharkianen
Validation of methods for determining thermal performance of fire protection systems of steel structures</p> | <p>113</p> |
| <p>В. Ковалишин, В. Марич, Р. Веселівський, Вол. Ковалишин, В. Чернецький
Оптимізація рецептури вогнегасного порошку спеціального призначення для комбінованого гасіння пожеж класу А, В та D</p> | <p>123</p> | <p>V. Kovalyshyn, V. Marych, R. Veselivskyi, Vol. Kovalyshyn, V. Chernetskyi
Optimization of the formulation of special-purpose fire extinguishing powder for combined extinguishing of class A, B and D fires</p> | <p>123</p> |
| <p>Д. Хроменков, Р. Кравченко, Н. Ільченко, О. Корольова, Ю. Гулик
Порівняльний аналіз вітчизняної та європейської пожежних класифікацій будівельної продукції</p> | <p>135</p> | <p>D. Khromenkov, R. Kravchenko, N. Ilchenko, O. Korolova, Yu. Gulyk
Comparative analysis of domestic and european fire classifications of building products</p> | <p>135</p> |
| <p>С. Трошкін, С Поздєєв, О. Некора, А. Бєліков
Визначення адекватності математичних моделей тепломасообміну під час виникнення пожеж у вертикальних кабельних тунелях атомних електричних станцій</p> | <p>153</p> | <p>S. Troshkin, S. Pozdieiev, O. Nekora, A. Belikov
Determination of adequacy of mathematical models for heat transfer during fire incidents in vertical cable tunnels of nuclear power plants</p> | <p>153</p> |
| <p>Л. Калиненко, М. Андрієнко, О. Слуцька
Вимоги до екіпірування рятувальників під час виконання аварійних робіт в осередку надзвичайної ситуації з виливом (викидом) радіоактивних та небезпечних хімічних речовин</p> | <p>162</p> | <p>L. Kalynenko, M. Andriyenko, O. Slutska
Requirements for the equipment of rescuers during the performance of emergency work at the center of an emergency with a spill (release) of radioactive and dangerous chemical substances</p> | <p>162</p> |
| <p>С. Огурцов
Використання CFD- моделювання для оцінювання параметрів розповсюдження небезпечних хімічних речовин</p> | <p>173</p> | <p>O. Ohurtsov
Use of CFD-modeling for estimation of distribution parameters of dangerous chemical substances</p> | <p>173</p> |

УДК 614.841.45

ВИЗНАЧЕННЯ ПРОМІЖКУ ЧАСУ ЗБЕРЕЖЕНОСТІ ВОГНЕСТІЙКОСТІ НЕСУЧИХ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ З РІЗНОЮ ПОЧАТКОВОЮ ТЕМПЕРАТУРОЮ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2.4-21>

Новак С. В.^{1*}, ORCID iD 0000-0001-7087-318X

Добростан О. В.¹, ORCID iD 0000-0001-8908-0729

Пустовий М. М.², ORCID iD 0000-0003-1434-4296

*E-mail: novak.s.fire@gmail.com

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

²Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції:

29.09.2023

Пройшла рецензування:

16.10.2023

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

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

АНОТАЦІЯ

Це дослідження присвячене визначенню проміжку часу збереженості вогнестійкості несучих сталевих конструкцій без огорожувальної функції, які мають під час випробування різну початкову температуру. За мету ставилось виявлення впливу початкової температури таких сталевих конструкцій, як балки і колони з одношаровою системою вогнезахисту, на проміжок часу збереженості їхньої вогнестійкості, для широких діапазонів параметрів цих конструкцій (теплофізичних властивостей застосовного вогнезахисного матеріалу, товщини вогнезахисту, критичної температури і коефіцієнта поперечного перерізу конструкції) та обґрунтування температурного показника для визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості цих конструкцій за несучою здатністю. Встановлено, що для застосованого під час розрахунків діапазону параметрів сталевих конструкцій різниця між значеннями проміжку часу до досягнення нормованої критичної температури, отриманими за мінімально допустимої початкової температури 10 °C і номінальної початкової температури 20 °C, може досягати 2,33%, а різниця між значеннями, отриманими за максимально допустимої початкової температури 40 °C, – 3,67%. Виявлено, що для визначення значення проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій, яке є найбільш наближеним до номінального значення, необхідне застосування показника, яким є проміжок часу до досягнення коригованої критичної температури. Розкрито залежність різниці між цією коригованою критичною температурою і нормованою критичною температурою від параметрів сталевих конструкцій. Показано, що у разі застосування цього показника відхил розрахункового проміжку часу збереженості вогнестійкості, визначеного за мінімально і максимально допустимих значень початкової температури сталевих конструкцій, від проміжку часу за номінальної початкової температури не перевищує 0,89%, що є прийнятною точністю для інженерних розрахунків.

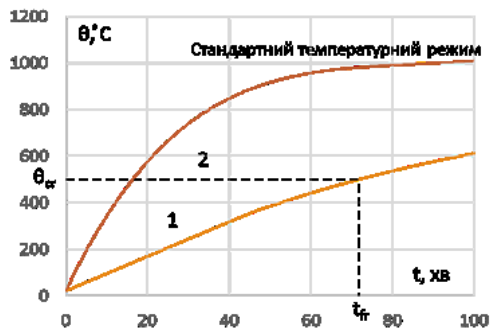
Постановка проблеми. Відповідно до Єврокоду 3 [1] і національного стандарту ДСТУ-Н Б В.2.6-211 [2] для несучих сталевих конструкцій без огорожувальної функції, таких як балки і колони (далі – сталеві конструкції), застосовні спрощені методи, за якими оцінювання вогнестійкості цих конструкцій здійснюють в температурних параметрах через порівняння фактичної температури сталевих конструкцій θ_a (далі – температури сталі) в умовах вогневого

впливу з її критичною температурою θ_{cr} . Цією критичною температурою є така, за якої очікується руйнування сталевих конструкцій у разі рівномірного розподілу температури у ній для заданого рівня навантаження, і її значення визначаються розрахунковим чи експериментальним шляхом або надаються в певних нормативних документах [1–2]. Для зазначеного оцінювання вогнестійкості вважають, що несуча здатність сталевих

конструкції зберігається, якщо виконується така умова [1–2]:

$$\theta_a \leq \theta_{cr}. \quad (1)$$

У разі застосування цієї умови для сценарію умовної пожежі визначають температуру сталі для різних проміжків часу вогневого впливу t і проміжок часу t_{fr} до досягнення критичної температури (рис. 1), який відповідає проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевій конструкції за несучою здатністю.



1 – крива температури сталі; 2 – горизонтальна лінія, що відповідає критичній температурі

Рисунок 1 – Приклад залежності температури сталі від проміжку часу вогневого впливу для сценарію умовної пожежі за стандартного температурного режиму

Такий підхід щодо визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій застосовують в значній кількості стандартизованих методів. Зокрема, його впроваджено в методи, наведені в EN 13381-4 [3], EN 13381-6 [4], EN 13381-8 [5], EN 13381-9 [6], EN 13381-10 [7], за якими визначають залежності між проміжком часу збереженості вогнестійкості, необхідною мінімальною товщиною вогнезахисту та іншими параметрами сталевих конструкцій, оснащених пасивними або реактивними системами вогнезахисту. Під час випробувань, які здійснюють за цими стандартами, вимірюють температуру сталі для набору зразків сталевих балок та (або) колон для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму і визначають проміжки часу до досягнення значень температури сталі від 350 °C до 700 °C (з кроком 50 °C). Також цей підхід упроваджено в методи оцінювання

властивостей горизонтальних і вертикальних вогнезахисних екранів, призначених для вогнезахисту несучих сталевих конструкцій, які наведено в EN 13381-1 [8] і EN 13381-2 [9]. Під час випробувань за цими методами визначають проміжки часу до досягнення значень температури сталі 510 °C (для балок [8], суцільних колон і порожнистих колон, заповнених бетоном, з армувальними стрижнями [9]) і 350 °C (для порожнистих колон, заповнених бетоном, без армувальних стрижнів [9]). Такий же підхід упроваджено і в методи, наведені в EN 16623 [10], за якими оцінюють стійкість до зовнішніх впливів і відповідність інших експлуатаційних характеристик передбачуваному використанню для сталевих конструкцій, оснащених системами вогнезахисту з реактивним покриттям. Під час випробувань за цим стандартом визначають значення проміжку часу до досягнення температури сталі 500 °C на металевій поверхні захищених сталевих колон або захищених сталевих пластин.

Потрібно зауважити, що у всіх наведених вище методах запроваджено однакові умови вогневого впливу на зразки сталевих конструкцій (вплив за стандартного температурного режиму) і вимоги щодо початкового середнього значення температури зразків, яке має бути в діапазоні від 10 °C до 40 °C, що регламентовано 5.1 і 10.3 EN 1363-1 [11]. Проте у разі випробування за однакових умов вогневого впливу однакових зразків сталевих конструкцій, які мають різну початкову температуру сталі, не можна виключати можливості отримання для цих зразків різних результатів визначення проміжку часу до досягнення певної температури сталі. Це пов'язано з відмінністю між значеннями кількості теплоти, необхідної для нагрівання цих зразків від початкової до певної температури сталі. Наприклад, під час нагрівання сталевій конструкції від мінімально допустимої початкової температури 10 °C до 500 °C значення кількості теплоти на 6,5%

$(100 \times ((500 - 10) - (500 - 40)) / (500 - 40))$ є більшим, ніж під час її нагрівання до цієї температури від максимально допустимої початкової температури 40 °С. Можливо, більш правильно було б для визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій за несучою здатністю (з метою усунення впливу неоднаковості початкової температури зразків) застосовувати інший показник, ніж проміжок часу вогневого впливу до досягнення критичної температури. Для будівельних конструкцій, які виконують огорожувальну функцію, визначають проміжок часу збереженості вогнестійкості за теплоізолювальною здатністю, якою відповідно до 3.1.9 1363-1 [11] є здатність конструкції обмежувати підвищення температури на її необігрівній поверхні до менших значень, ніж задані. Згідно з 11.3 1363-1 [11] під час випробувань цих конструкцій для визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості за теплоізолювальною здатністю встановлюють не проміжки часу вогневого впливу до досягнення певних температур на необігрівній поверхні конструкції, а проміжки часу, за якими підвищення середньої та максимальної температур на необігрівній поверхні конструкції відносно початкової середньої температури цієї поверхні становить 140 °С і 180 °С відповідно. Можливо, запровадження для визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій за несучою здатністю показника, яким є підвищення температури сталі щодо її початкової температури, замість показника щодо досягнення певної критичної температури, дасть змогу підвищити точність визначення цього проміжку часу. Однак на підтвердження цієї гіпотези в джерелах інформації не наведено відповідних даних. Отже, є підстави вважати, що недостатня обґрунтованість температурного показника для визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій за несучою здатністю зумовлює необхідність проведення дослідження в цьому напрямі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні немає загальноприйнятого єдиного критерію, який визначає втрату вогнестійкості сталевих конструкцій. Традиційно цю втрату оцінюють з погляду критичної температури сталеві конструкції та її максимальної деформації або швидкості деформації [12].

Із застосуванням критерію деформації досліджено вогнестійкість суцільних і порожнистих сталевих колон і балок в широкому діапазоні їх поперечного перерізу, виготовлених із різних матеріалів, в умовах рівномірного і нерівномірного нагрівання. Зокрема, досліджено вогнестійкість аксіально навантажених двотаврових колон з вуглецевої сталі і виявлено вплив співвідношення їхньої ширини до товщини та залишкової напруженості на несучу здатність [13]. У роботі [14] вивчено вплив різних параметрів на вогнестійкість квадратних порожнистих колон із нержавкої сталі у разі осьового стиснення й встановлено нові формули для граничної несучої здатності цих конструкцій за підвищених температур. Результати дослідження, наведені в роботі [15], показали, що сталеві колони, піддані нерівномірному нагріванню, втрачали несучу здатність за нижчих середніх температур сталі, ніж колони, піддані рівномірному нагріванню. Однак колони, які піддавалися рівномірному нагріванню, досягали своїх температур руйнування швидше, ніж колони, піддані нерівномірному нагріванню. Дослідженням несучої здатності суцільних і порожнистих сталевих балок за підвищених температур виявлено, що у разі теплового впливу тільки з нижньої поверхні балки прогин був меншим, ніж за теплового впливу лише на бічні грані балки [16].

Дослідження із застосуванням критерію критичної температури в основному зосереджені на конструкціях із вуглецевої сталі. В роботі [17] аналізували критичні температури сталевих конструкцій поперечного перерізу 4 класу, і запропонували для них діапазон

критичної температури від 400 °C до 600 °C, в той час як в Єврокод 3 [1] це значення становить 350 °C. З огляду на результати розвідок, наведених у роботі [18], виявлено, що модель аналізу кінцевих елементів (FEA), яка використовує властивості сталі, регламентовані Національним інститутом стандартів і технологій США (NIST), може передбачити критичну температуру, яка відповідає граничній деформації сталевій колони, точніше, ніж модель FEA з використанням властивостей сталі, наведених в Єврокод 3 [1]. Крім того, температура руйнування сталевій колони, яка піддається локальному вогневому впливу, може бути нижчою, ніж температура руйнування, визначена для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму. Дослідження вогнестійкості холодноформованих сталевих колон показали, що критична температура сталевих колон із нерівномірним розподілом температури вища, ніж у колон із рівномірним розподілом температури [19–20]. За результатами досліджень закріплених суцільних сталевих колон встановлено, що критичні температури цих конструкцій знижуються зі збільшенням структурної жорсткості для малих ексцентриситетів навантаження [21–23]. На підставі даних випробувань і валідованих моделей кінцево-елементного аналізу визначено уточнені критичні температури для сталевих колон, заповнених бетоном [24].

Порівняння різних структурних і теплових критеріїв втрати вогнестійкості сталевих конструкцій (гранична деформація, критична температура), наведене в роботі [12], показує, що між ними немає узгодженості, а критерій критичної температури не може точно передбачити втрату несучої здатності в часі, просторі або режимі руйнування сталевих конструкцій, які піддаються як рівномірному, так і нерівномірному нагріванню. Втрату вогнестійкості сталевих конструкцій можна передбачити лише за допомогою розширеного структурного аналізу, тому для

проектування цих конструкцій недостатньо лише теплового аналізу. Проте в цій роботі показано, що використання критерію критичної температури для простих сталевих конструкцій призводить до консервативних результатів оцінювання їхньої вогнестійкості.

Наведені вище результати досліджень дають змогу обґрунтовано підходити до оцінювання вогнестійкості суцільних і порожнистих сталевих конструкцій різного поперечного перерізу в умовах їхнього рівномірного і нерівномірного нагрівання. Однак у результатах цих досліджень немає даних щодо точності визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості таких конструкцій – проміжку часу до досягнення граничної деформації або критичної температури. Також не наведено параметрів, які можуть впливати на цю точність, яким, зокрема, є початкова температура конструкції до вогневого впливу. Визначення зазначеного проміжку часу за різною початковою температурою може призвести до результатів, які не є однаковими. Така невизначеність не дає змоги вибрати температурний показник, який придатний для визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій за несучою здатністю з прийнятною точністю.

Формулювання цілей дослідження. За мету дослідження ставилось виявлення впливу початкової температури таких сталевих конструкцій, як балки і колони з одношаровою системою вогнезахисту, на проміжок часу збереженості їхньої вогнестійкості, для широких діапазонів параметрів цих конструкцій (теплофізичних властивостей застосовного вогнезахисного матеріалу, товщини вогнезахисту, критичної температури і коефіцієнта поперечного перерізу конструкції) та обґрунтування температурного показника для визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій за несучою здатністю.

Для досягнення цієї мети було поставлено такі завдання:

– для умов вогневого впливу за

стандартного температурного режиму і широкого діапазону параметрів сталеві конструкції з одношаровою системою вогнезахисту визначити дані щодо проміжку часу збереженості вогнестійкості цієї конструкції за різних значень її початкової температури (номінального $\theta_{0,nom} = 20$ °C, мінімально допустимого $\theta_{0,min} = 10$ °C і максимально допустимого $\theta_{0,max} = 40$ °C);

– визначити дані щодо різниці між значеннями проміжку часу збереженості вогнестійкості сталеві конструкції з одношаровою системою вогнезахисту, отриманими за початкових температур $\theta_{0,min}$ і $\theta_{0,max}$, і значеннями цього проміжку часу за номінальної початкової температури $\theta_{0,nom}$;

– виявити залежності цієї різниці між проміжками часу збереженості вогнестійкості від параметрів сталеві конструкції з одношаровою системою вогнезахисту;

– обґрунтувати температурний показник, придатний для визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій за несучою здатністю з прийнятною точністю.

Методи дослідження. Застосовано метод дослідження, складовими якого є обчислювальна процедура чисельного моделювання теплового стану сталеві конструкції, оснащеної вогнезахисним покриттям із заданими теплофізичними властивостями, в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму (процедура розв’язання прямої задачі теплопровідності), процедури аналізу, порівняння, узагальнення, апроксимації та систематизації отриманих розрахункових даних із використанням лінійного числового регресійного аналізу. Для розрахунку теплового стану сталеві конструкції в умовах вогневого впливу (температури сталі для різних проміжків часу вогневого впливу) використано одномірну двошарову математичну модель теплопровідності, яка складається із системи рівнянь, наведеної в [25]. Значення коефіцієнтів тепловіддачі конвекцією і теплового випромінювання на

обігрівній поверхні вогнезахисного покриття, теплофізичні властивості сталі та інші параметри цієї моделі вибрані такими, як наведено в [1–2; 26]. Розв’язання математичної моделі й прямої задачі теплопровідності з визначення температури сталі виконано методом кінцевих різниць за неявною схемою апроксимації [27].

Виклад основного матеріалу.

Розв’язанням прямої задачі теплопровідності для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму і широкого діапазону параметрів сталеві конструкції з одношаровою системою вогнезахисту визначали дані щодо проміжку часу збереженості вогнестійкості цієї конструкції за різних значень її початкової температури θ_0 (номінального $\theta_{0,nom} = 20$ °C, мінімально допустимого $\theta_{0,min} = 10$ °C і максимально допустимого $\theta_{0,max} = 40$ °C). Водночас розглядали два варіанти, для одного з них (варіант № 1) показником для визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості було досягнення критичної температури, а для іншого (варіант № 2) – досягнення коригованої критичної температури, значення якої залежить від початкової температури θ_0 . Таким чином, для варіанта № 1 проміжок часу збереженості вогнестійкості дорівнював тривалості вогневого впливу до досягнення критичної температури θ_{cr} , а для варіанта № 2 – до досягнення коригованої критичної температури $\theta_{cr,mod}$, яку розраховували за формулою (2). Наприклад, для критичної температури θ_{cr} , яка становить 500 °C, для варіанта № 1 визначали проміжок часу $t_{fr,10}$ змінювання температури сталі від початкової $\theta_{0,min} = 10$ °C до $\theta_{cr} = 500$ °C і проміжок часу $t_{fr,40}$ змінювання температури сталі від початкової $\theta_{0,max} = 40$ °C до $\theta_{cr} = 500$ °C, а для варіанта № 2 визначали проміжок часу $t_{fr,10}$ змінювання температури сталі від початкової $\theta_{0,min} = 10$ °C до $\theta_{cr,mod} = 490$ °C і проміжок часу $t_{fr,40}$ змінювання температури сталі від початкової $\theta_{0,max} = 40$ °C до $\theta_{cr,mod} = 520$ °C.

$$\theta_{cr,mod} = \theta_{cr} - \theta_{0,nom} + \theta_0. \quad (2)$$

Процедуру визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевій конструкції за різних значень їхньої початкової температури, теплофізичних властивостей застосовного вогнезахисного матеріалу (його коефіцієнта теплопровідності λ_p і питомої теплоємності $c_p\rho_p$), товщини вогнезахисту $d_{p,min}$, коефіцієнта поперечного перерізу захищеної сталевій конструкції A_p/V і критичної температури θ_{cr} вибрано такою.

Для стандартного температурного режиму і одношарової системи вогнезахисту з необхідною мінімальною товщиною $d_{p,min}$ через розв'язання прямої задачі теплопровідності визначали проміжок часу ($t_{fr,10}$ або $t_{fr,40}$), за якого розрахункова температура сталевій конструкції $\theta_{a,cal}$ з коефіцієнтом поперечного перерізу A_p/V дорівнює критичній температурі θ_{cr} (для варіанта № 1) або коригованій критичній температурі $\theta_{cr,mod}$ (для варіанта № 2), за умови, що початкова температура цієї конструкції дорівнює її мінімально

допустимому значенню $\theta_{0,min} = 10$ °С або максимально допустимому значенню $\theta_{0,max} = 40$ °С. Ці розрахунки виконували для значень A_p/V , λ_p , θ_{cr} , $d_{p,min}$, t_{fr} , наведених у табл. 1, і $c_p\rho_p = 500$ кДж/(м³·°С) ($c_p = 1000$ Дж/(кг·°С), $\rho_p = 500$ кг/м³), які взято з роботи [25]. У цій таблиці наведено дані щодо необхідної мінімальної товщини одношарової системи вогнезахисту $d_{p,min}$, отримані для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму за такими параметрами сталевій конструкції: $(A_p/V)_{min} = 40$ м⁻¹, $(A_p/V)_{med} = 150$ м⁻¹, $(A_p/V)_{max} = 300$ м⁻¹; $\lambda_{p,min} = 0,02$ Вт/(м·°С), $\lambda_{p,med} = 0,2$ Вт/(м·°С), $\lambda_{p,max} = 2,0$ Вт/(м·°С); $\theta_{cr,min} = 350$ °С, $\theta_{cr,med} = 500$ °С, $\theta_{cr,max} = 700$ °С; $\theta_{cr,min} = 350$ °С, $\theta_{cr,med} = 500$ °С, $\theta_{cr,max} = 700$ °С, $t_{fr,min} = 30$ хв; $t_{fr,med} = 90$ хв; $t_{fr,max} = 240$ хв. Наявні прочерки в табл. 1 пов'язані з тим, що для зазначених параметрів (A_p/V , λ_p , $\theta_{cr,max}$, $t_{fr,min}$) сталева конструкція не потребує вогнезахисту.

Таблиця 1 – Дані щодо необхідної мінімальної товщини вогнезахисту, отримані для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму і номінальної початкової температури сталевій конструкції [25]

A_p/V , м ⁻¹	λ_p , Вт/(м·°С)	Необхідна мінімальна товщина вогнезахисту $d_{p,min}$ (у мм) для:								
		$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,max}$
40	0,02	0,44	0,17	–	2,07	1,13	0,49	6,75	3,94	1,98
150	0,02	1,89	0,96	0,29	7,28	4,26	1,99	20,2	13,2	7,15
300	0,02	3,64	1,97	0,68	12,1	7,74	3,90	28,7	20,8	12,7
40	0,2	4,25	1,64	–	19,4	11,1	4,83	56,5	35,9	19,1
150	0,2	15,8	8,78	2,81	48,1	33,0	17,8	105	80,4	53,2
300	0,2	24,3	15,4	6,21	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	107	404	331	251
300	2,0	101	73,3	38,5	229	184	132	427	356	279

Отримані через розв'язання прямої задачі теплопровідності розрахункові значення проміжків часу $t_{fr,10}$ та $t_{fr,40}$, визначені для варіантів № 1 і № 2, наведено в табл. 2, 3 і табл. 4, 5 відповідно. В цих таблицях $d_{p,min,30}$, $d_{p,min,90}$, $d_{p,min,240}$ – це значення товщини вогнезахисту, які дорівнюють величинам необхідної мінімальної товщини вогнезахисту $d_{p,min}$ (див. табл. 1), отриманим відповідно для проміжків часу вогневого впливу $t_{fr,min} = 30$ хв, $t_{fr,med} = 90$ хв, $t_{fr,max} = 240$ хв за

стандартного температурного режиму і номінальної початкової температури $\theta_{0,nom} = 20$ °С. У цих таблицях, також як і в деяких інших, які зазначені в цьому дослідженні, наведено стандартні відхилення S (середньо квадратичні відхилення) і відносні стандартні відхилення. Наприклад, у табл. 2 для $\theta_{cr,min}$, $d_{p,min,30}$ вказано значення $S = 0,12$ хв і значення відносного стандартного відхилення $100S/t_{fr,10} = 100 \times 0,12/30,4 = 0,40\%$.

Таблиця 2 – Дані щодо проміжку часу збереженості вогнестійкості $t_{fr,10}$, отримані за мінімально допустимої початкової температури сталевих конструкцій для варіанта № 1

A_p/V , M^{-1}	λ_p , Вт/(м·°C)	Проміжок часу $t_{fr,10}$ (у хв) для:								
		$\theta_{cr,min}$, $d_{p,min,30}$	$\theta_{cr,med}$, $d_{p,min,30}$	$\theta_{cr,max}$, $d_{p,min,30}$	$\theta_{cr,min}$, $d_{p,min,90}$	$\theta_{cr,med}$, $d_{p,min,90}$	$\theta_{cr,max}$, $d_{p,min,90}$	$\theta_{cr,min}$, $d_{p,min,240}$	$\theta_{cr,med}$, $d_{p,min,240}$	$\theta_{cr,max}$, $d_{p,min,240}$
40	0,02	30,7	30,2	—	91,4	90,6	90,1	243,7	242,5	241,4
150	0,02	30,4	30,2	30,1	91,5	90,8	90,2	244,6	243,1	240,7
300	0,02	30,4	30,2	30,1	91,4	90,8	90,4	243,7	242,2	241,5
40	0,2	30,4	30,2	—	91,5	91,5	90,2	243,9	242,2	241,6
150	0,2	30,4	30,2	30,1	91,2	90,8	90,3	243,3	242,2	240,8
300	0,2	30,4	30,2	30,1	91,1	90,8	90,2	244,3	242,1	240,9
40	2,0	30,3	30,2	—	91,7	90,7	90,4	243,2	242,2	241,5
150	2,0	30,3	30,2	30,1	91,2	90,6	90,8	243,5	242,0	241,7
300	2,0	30,3	30,2	30,1	91,3	91,0	90,7	243,5	242,3	240,9
Середнє значення		30,4	30,2	30,1	91,4	90,8	90,4	243,7	242,3	241,2
Стандартний відхил		0,12	0,00	0,00	0,19	0,27	0,24	0,46	0,33	0,39
Відносний стандартний відхил, %		0,40	0,00	0,00	0,20	0,30	0,27	0,19	0,13	0,16

Таблиця 3 – Дані щодо проміжку часу збереженості вогнестійкості $t_{fr,40}$, отримані за максимально допустимої початкової температури сталевих конструкцій для варіанта № 1

A_p/V , M^{-1}	λ_p , Вт/(м·°C)	Проміжок часу $t_{fr,40}$ (у хв) для:								
		$\theta_{cr,min}$, $d_{p,min,30}$	$\theta_{cr,med}$, $d_{p,min,30}$	$\theta_{cr,max}$, $d_{p,min,30}$	$\theta_{cr,min}$, $d_{p,min,90}$	$\theta_{cr,med}$, $d_{p,min,90}$	$\theta_{cr,max}$, $d_{p,min,90}$	$\theta_{cr,min}$, $d_{p,min,240}$	$\theta_{cr,med}$, $d_{p,min,240}$	$\theta_{cr,max}$, $d_{p,min,240}$
40	0,02	29,4	29,7	—	87,0	88,3	89,5	231,2	235,5	238,2
150	0,02	29,2	29,7	29,9	87,3	88,5	89,3	233,3	236,3	237,6
300	0,02	29,4	29,6	29,9	87,5	88,6	89,5	233,1	235,7	238,4
40	0,2	29,1	29,5	—	87,3	89,2	89,3	232,2	235,4	238,4
150	0,2	29,1	29,6	29,9	87,4	88,8	89,4	233,3	235,9	237,6
300	0,2	29,3	29,6	29,9	87,6	88,7	89,4	234,8	235,9	237,5
40	2,0	29,1	29,5	—	87,9	88,5	89,4	233,2	235,8	238,2
150	2,0	29,3	29,6	29,9	87,8	88,5	89,1	234,0	235,8	238,2
300	2,0	29,3	29,6	29,9	87,8	88,9	89,2	233,9	235,6	237,3
Середнє значення		29,2	29,6	29,9	87,5	88,7	89,3	233,2	235,8	237,93
Стандартний відхил		0,12	0,07	0,00	0,29	0,27	0,13	1,04	0,26	0,43
Відносний стандартний відхил, %		0,42	0,24	0,00	0,34	0,30	0,15	0,45	0,11	0,18

Таблиця 4 – Дані щодо проміжку часу збереженості вогнестійкості $t_{fr,10}$, отримані за мінімально допустимої початкової температури сталевих конструкцій для варіанта № 2

A_p/V , M^{-1}	λ_p , Вт/(м·°C)	Проміжок часу $t_{fr,10}$ (у хв) для:								
		$\theta_{cr,min}$, $d_{p,min,30}$	$\theta_{cr,med}$, $d_{p,min,30}$	$\theta_{cr,max}$, $d_{p,min,30}$	$\theta_{cr,min}$, $d_{p,min,90}$	$\theta_{cr,med}$, $d_{p,min,90}$	$\theta_{cr,max}$, $d_{p,min,90}$	$\theta_{cr,min}$, $d_{p,min,240}$	$\theta_{cr,med}$, $d_{p,min,240}$	$\theta_{cr,max}$, $d_{p,min,240}$
40	0,02	29,7	29,7	—	88,3	88,1	87,2	235,6	235,9	233,7
150	0,02	29,4	29,3	28,9	88,6	88,3	87,0	237,3	236,8	233,1
300	0,02	29,4	29,3	28,8	88,6	88,4	87,3	237,3	236,7	234,3
40	0,2	29,4	29,4	—	88,5	89,0	87,2	236,5	235,9	234,0
150	0,2	29,4	29,3	28,8	88,7	88,5	87,3	237,3	236,9	234,1
300	0,2	29,6	29,3	28,8	88,9	88,7	87,6	239,0	237,3	234,9
40	2,0	29,4	29,4	—	89,2	88,4	87,5	237,3	236,8	234,7
150	2,0	29,6	29,5	29,0	89,2	89,2	88,4	238,4	237,5	236,2
300	2,0	29,7	29,5	29,1	89,3	89,2	88,0	238,5	237,7	236,1
Середнє значення		29,5	29,4	28,90	88,8	88,6	87,5	237,5	236,8	234,6
Стандартний відхил		0,14	0,14	0,13	0,36	0,40	0,44	1,05	0,63	1,04
Відносний стандартний відхил, %		0,46	0,46	0,44	0,40	0,46	0,51	0,44	0,27	0,44

Таблиця 5 – Дані щодо проміжку часу збереженості вогнестійкості $t_{fr,40}$, отримані за максимально допустимої початкової температури сталеві конструкції для варіанта № 2

A_p/V , M^{-1}	λ_p , $Вт/(м \cdot ^\circ C)$	Проміжок часу $t_{fr,40}$ (у хв) для:								
		$\theta_{cr,min}$, $d_{p,min,30}$	$\theta_{cr,med}$, $d_{p,min,30}$	$\theta_{cr,max}$, $d_{p,min,30}$	$\theta_{cr,min}$, $d_{p,min,90}$	$\theta_{cr,med}$, $d_{p,min,90}$	$\theta_{cr,max}$, $d_{p,min,90}$	$\theta_{cr,min}$, $d_{p,min,240}$	$\theta_{cr,med}$, $d_{p,min,240}$	$\theta_{cr,max}$, $d_{p,min,240}$
40	0,02	31,4	31,5	—	93,5	93,5	96,7	248,0	249,2	257,0
150	0,02	31,3	31,5	32,8	93,4	93,8	96,8	248,1	249,3	255,9
300	0,02	31,2	31,5	32,9	93,1	93,6	97,0	246,3	247,4	255,5
40	0,2	31,2	31,2	—	93,3	94,7	96,5	247,5	248,5	256,7
150	0,2	31,2	31,4	32,7	92,7	93,4	96,6	245,3	246,9	253,3
300	0,2	31,1	31,3	32,8	92,2	93,0	96,0	245,9	245,8	251,0
40	2,0	31,1	31,1	—	93,2	93,2	96,2	245,5	247,0	254,7
150	2,0	30,9	31,2	32,5	92,4	92,5	95,7	244,6	245,2	250,3
300	2,0	30,8	31,1	32,4	92,0	92,6	94,2	244,2	244,8	248,0
Середнє значення		31,1	31,3	32,7	92,9	93,4	96,2	246,2	247,1	253,6
Стандартний відхил		0,19	0,17	0,19	0,56	0,67	0,85	1,44	1,66	3,17
Відносний стандартний відхил, %		0,60	0,54	0,59	0,60	0,71	0,88	0,58	0,67	1,25

Із аналізу даних, наведених у табл. 2, 3, випливає, що для варіанта № 1 і застосованого у розрахунках діапазону параметрів сталеві конструкції, який оцінено, проміжок часу збереженості її вогнестійкості змінюється від 30,1 хв до 244,6 хв і від 29,1 хв до 238,4 хв, відповідно за умов, що початкова температура цієї конструкції дорівнює її мінімально допустимому значенню $\theta_{0,min} = 10^\circ C$ і максимально допустимому значенню $\theta_{0,max} = 40^\circ C$. Для цього варіанта значення $t_{fr,10}$ більші за $t_{fr,40}$ (визначені для однакових параметрів сталеві конструкції). Для варіанта № 2 у цьому ж діапазоні параметрів сталеві конструкції проміжок часу збереженості її вогнестійкості змінюється від 28,8 хв до 239,0 хв і від 30,8 хв до 257,0 хв за тих же умов стосовно її початкової температури, а значення $t_{fr,10}$ менші за $t_{fr,40}$. Різниця між величинами $t_{fr,10}$ і $t_{fr,40}$ залежить від параметрів сталеві конструкції і змінюється від 0,2 хв (для $\theta_{cr,max}$, $d_{p,min,30}$, $t_{fr,min}$) до 12,5 хв (для $(A_p/V)_{min}$, $\lambda_{p,min}$, $\theta_{cr,min}$, $d_{p,min,240}$, $t_{fr,max}$) – для варіанта № 1, і від -1,1 хв (для $(A_p/V)_{max}$, $\lambda_{p,max}$, $\theta_{cr,min}$, $d_{p,min,30}$, $t_{fr,min}$) до -23,3 хв (для $(A_p/V)_{min}$, $\lambda_{p,min}$, $\theta_{cr,max}$, $d_{p,min,240}$, $t_{fr,max}$) – для варіанта № 2.

У табл. 6, 7 (для варіанта № 1) і табл. 8, 9 (для варіанта № 2) наведено дані щодо різниці між значеннями проміжку

часу збереженості вогнестійкості сталеві конструкції ($t_{fr,10}$ і $t_{fr,40}$), отриманими за умови, що її початкова температура дорівнює мінімально допустимому значенню $\theta_{0,min} = 10^\circ C$ або максимально допустимому значенню $\theta_{0,max} = 40^\circ C$ (див. табл. 2, 3 і табл. 4, 5), і значеннями такого ж проміжку часу t_{fr} ($t_{fr,min} = 30$ хв; $t_{fr,med} = 90$ хв; $t_{fr,max} = 240$ хв) за номінальної початкової температури $\theta_{0,nom} = 20^\circ C$. Цю різницю розраховували за такими формулами:

$$\delta_{t,10} = 100(t_{fr,10} - t_{fr})/t_{fr}; \quad (3)$$

$$\delta_{t,40} = 100(t_{fr,40} - t_{fr})/t_{fr}, \quad (4)$$

де $\delta_{t,10}$ – різниця між значенням проміжку часу збереженості вогнестійкості сталеві конструкції, отриманим за мінімально допустимої початкової температури $\theta_{0,min} = 10^\circ C$, і значенням цього проміжку часу за номінальної початкової температури $\theta_{0,nom} = 20^\circ C$, %;

$\delta_{t,40}$ – різниця між значенням проміжку часу збереженості вогнестійкості сталеві конструкції, отриманим за максимально допустимої початкової температури $\theta_{0,max} = 40^\circ C$, і значенням цього проміжку часу за номінальної початкової температури $\theta_{0,nom} = 20^\circ C$, %;

$t_{fr,10}$ і $t_{fr,40}$ – значення проміжку часу збереженості вогнестійкості сталеві конструкції, отримані відповідно за мінімально і максимально допустимої початкової температури ($\theta_{0,min} = 10^\circ C$ і $\theta_{0,max} = 40^\circ C$), які

наведено в табл. 2, 3 (для варіанта № 1) і табл. 4, 5 (для варіанта № 2), хв;
 t_{fr} – значення проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих

конструкції за номінальної початкової температури ($\theta_{0, \text{ном}} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$), яке наведене в табл. 1 ($t_{fr, \text{min}} = 30 \text{ хв}$; $t_{fr, \text{med}} = 90 \text{ хв}$; $t_{fr, \text{max}} = 240 \text{ хв}$), хв.

Таблиця 6 – Дані щодо різниці $\delta_{t,10}$ для варіанта № 1

A_p/V , м^{-1}	λ_p , $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$	Різниця $\delta_{t,10}$ (у %) для:								
		$\theta_{cr, \text{min}},$ $t_{fr, \text{min}}$	$\theta_{cr, \text{med}},$ $t_{fr, \text{min}}$	$\theta_{cr, \text{max}},$ $t_{fr, \text{min}}$	$\theta_{cr, \text{min}},$ $t_{fr, \text{med}}$	$\theta_{cr, \text{med}},$ $t_{fr, \text{med}}$	$\theta_{cr, \text{max}},$ $t_{fr, \text{med}}$	$\theta_{cr, \text{min}},$ $t_{fr, \text{max}}$	$\theta_{cr, \text{med}},$ $t_{fr, \text{max}}$	$\theta_{cr, \text{max}},$ $t_{fr, \text{max}}$
40	0,02	2,33	0,67	–	1,56	0,67	0,11	1,54	1,04	0,58
150	0,02	1,33	0,67	0,33	1,67	0,89	0,22	1,92	1,29	0,29
300	0,02	1,33	0,67	0,33	1,56	0,89	0,44	1,54	0,92	0,63
40	0,2	1,33	0,67	–	1,67	1,67	0,22	1,63	0,92	0,67
150	0,2	1,33	0,67	0,33	1,33	0,89	0,33	1,38	0,92	0,33
300	0,2	1,33	0,67	0,33	1,22	0,89	0,22	1,79	0,87	0,38
40	2,0	1,00	0,67	–	1,89	0,78	0,44	1,33	0,92	0,63
150	2,0	1,00	0,67	0,33	1,33	0,67	0,89	1,46	0,83	0,71
300	2,0	1,00	0,67	0,33	1,44	1,11	0,78	1,46	0,96	0,38
Середнє значення		1,33	0,67	0,33	1,52	0,94	0,41	1,56	0,96	0,51
Стандартний відхил		0,41	0,00	0,00	0,21	0,30	0,27	0,19	0,14	0,16

Таблиця 7 – Дані щодо різниці $\delta_{t,40}$ для варіанта № 1

A_p/V , м^{-1}	λ_p , $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$	Різниця $\delta_{t,40}$ (у %) для:								
		$\theta_{cr, \text{min}},$ $t_{fr, \text{min}}$	$\theta_{cr, \text{med}},$ $t_{fr, \text{min}}$	$\theta_{cr, \text{max}},$ $t_{fr, \text{min}}$	$\theta_{cr, \text{min}},$ $t_{fr, \text{med}}$	$\theta_{cr, \text{med}},$ $t_{fr, \text{med}}$	$\theta_{cr, \text{max}},$ $t_{fr, \text{med}}$	$\theta_{cr, \text{min}},$ $t_{fr, \text{max}}$	$\theta_{cr, \text{med}},$ $t_{fr, \text{max}}$	$\theta_{cr, \text{max}},$ $t_{fr, \text{max}}$
40	0,02	–2,00	–1,00	–	–3,33	–1,89	–0,56	–3,67	–1,88	–0,75
150	0,02	–2,67	–1,00	–0,33	–3,00	–1,67	–0,78	–2,79	–1,54	–1,00
300	0,02	–2,00	–1,33	–0,33	–2,78	–1,56	–0,56	–2,88	–1,79	–0,67
40	0,2	–3,00	–1,67	–	–3,00	–0,89	–0,78	–3,25	–1,92	–0,67
150	0,2	–3,00	–1,33	–0,33	–2,89	–1,33	–0,67	–2,79	–1,71	–1,00
300	0,2	–2,33	–1,33	–0,33	–2,67	–1,44	–0,67	–2,17	–1,71	–1,04
40	2,0	–3,00	–1,67	–	–2,33	–1,67	–0,67	–2,83	–1,75	–0,75
150	2,0	–2,33	–1,33	–0,33	–2,44	–1,67	–1,00	–2,50	–1,75	–0,75
300	2,0	–2,33	–1,33	–0,33	–2,44	–1,22	–0,89	–2,54	–1,83	–1,13
Середнє значення		–2,52	–1,33	–0,33	–2,76	–1,48	–0,73	–2,82	–1,76	–0,86
Стандартний відхил		0,41	0,24	0,00	0,33	0,30	0,15	0,44	0,11	0,18

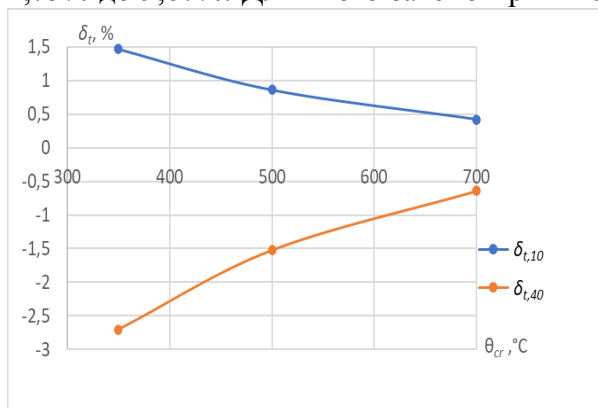
Таблиця 8 – Дані щодо різниці $\delta_{t,10}$ для варіанта № 2

A_p/V , м^{-1}	λ_p , $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$	Різниця $\delta_{t,10}$ (у %) для:								
		$\theta_{cr, \text{min}},$ $t_{fr, \text{min}}$	$\theta_{cr, \text{med}},$ $t_{fr, \text{min}}$	$\theta_{cr, \text{max}},$ $t_{fr, \text{min}}$	$\theta_{cr, \text{min}},$ $t_{fr, \text{med}}$	$\theta_{cr, \text{med}},$ $t_{fr, \text{med}}$	$\theta_{cr, \text{max}},$ $t_{fr, \text{med}}$	$\theta_{cr, \text{min}},$ $t_{fr, \text{max}}$	$\theta_{cr, \text{med}},$ $t_{fr, \text{max}}$	$\theta_{cr, \text{max}},$ $t_{fr, \text{max}}$
40	0,02	–1,00	–1,00	–	–1,89	–2,11	–3,11	–1,83	–1,71	–2,63
150	0,02	–2,00	–2,33	–3,67	–1,56	–1,89	–3,33	–1,13	–1,33	–2,88
300	0,02	–2,00	–2,33	–4,00	–1,56	–1,78	–3,00	–1,13	–1,38	–2,38
40	0,2	–2,00	–2,00	–	–1,67	–1,11	–3,11	–1,46	–1,71	–2,50
150	0,2	–2,00	–2,33	–4,00	–1,44	–1,67	–3,00	–1,13	–1,29	–2,46
300	0,2	–1,33	–2,33	–4,00	–1,22	–1,44	–2,67	–0,42	–1,13	–2,13
40	2,0	–2,00	–2,00	–	–0,89	–1,78	–2,78	–1,13	–1,33	–2,21
150	2,0	–1,33	–1,67	–3,33	–0,89	–0,89	–1,78	–0,67	–1,04	–1,58
300	2,0	–1,00	–1,67	–3,00	–0,78	–0,89	–2,22	–0,63	–0,96	–1,63
Середнє значення		–1,63	–1,96	–3,67	–1,32	–1,51	–2,78	–1,06	–1,32	–2,27
Стандартний відхил		0,46	0,45	0,42	0,40	0,45	0,49	0,44	0,26	0,43

Таблиця 9 – Дані щодо різниці $\delta_{t,40}$ для варіанта № 2

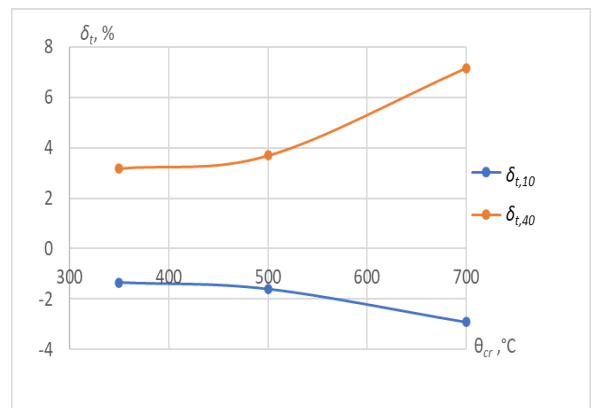
A_p/V , м^{-1}	λ_p , $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	Різниця $\delta_{t,40}$ (у %) для:								
		$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,max}$
40	0,02	4,67	5,00	—	3,89	3,89	7,44	3,33	3,83	7,08
150	0,02	4,33	5,00	9,33	3,78	4,22	7,56	3,38	3,88	6,63
300	0,02	4,00	5,00	9,67	3,44	4,00	7,78	2,63	3,08	6,46
40	0,2	4,00	4,00	—	3,67	5,22	7,22	3,13	3,54	6,96
150	0,2	4,00	4,67	9,00	3,00	3,78	7,33	2,21	2,88	5,54
300	0,2	3,67	4,33	9,33	2,44	3,33	6,67	2,46	2,42	4,58
40	2,0	3,67	3,67	—	3,56	3,56	6,89	2,29	2,92	6,13
150	2,0	3,00	4,00	8,33	2,67	2,78	6,33	1,92	2,17	4,29
300	2,0	2,67	3,67	8,00	2,22	2,89	4,67	1,75	2,00	3,33
Середнє значення		3,78	4,37	8,94	3,19	3,74	6,88	2,57	2,97	5,67
Стандартний відхил		0,62	0,56	0,65	0,62	0,74	0,94	0,60	0,69	1,32

Із аналізу даних, наведених у табл. 6–9, випливає, що для варіанта № 1 і застосованого у розрахунках діапазону параметрів сталеві конструкції значення різниць $\delta_{t,10}$ і $\delta_{t,40}$ змінюється від 0,22% до 2,33% і від –0,33% до –3,67% відповідно. Закономірним для цього варіанта є зменшення цих різниць (за модулем) з підвищенням критичної температури θ_{cr} . Зокрема, за $(A_p/V)_{med} = 150 \text{ м}^{-1}$, $\lambda_{p,med} = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$, $t_{fr,med} = 90 \text{ хв}$ і підвищенні θ_{cr} від 350°C до 700°C значення різниць $\delta_{t,10}$ і $\delta_{t,40}$ зменшується від 1,33% до 0,33% і від –2,89% до –0,67%, відповідно (рис. 2а). Для варіанта № 2 значення різниць $\delta_{t,10}$ і $\delta_{t,40}$ змінюється відповідно від –0,63% до –4,00% і від 1,75% до 9,67%. Для нього закономірним є



а

збільшення цих різниць (за модулем) з підвищенням критичної температури θ_{cr} . Зокрема, за $(A_p/V)_{med} = 150 \text{ м}^{-1}$, $\lambda_{p,med} = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$, $t_{fr,med} = 90 \text{ хв}$ і підвищенні θ_{cr} від 350°C до 700°C значення різниць $\delta_{t,10}$ і $\delta_{t,40}$ збільшується від –1,44% до –3,00% і від 3,00% до 7,33% відповідно (рис. 2б). Для варіантів № 1 і № 2 кореляція між різницями $\delta_{t,10}$ і $\delta_{t,40}$ та коефіцієнтами поперечного перерізу A_p/V і теплопровідності λ_p вогнезахисного матеріалу не спостерігається. Графічні залежності, наведені на рис. 2, побудовано за даними щодо середніх значень, які мають різниці $\delta_{t,10}$ і $\delta_{t,40}$ для проміжків часу $t_{fr,min}$, $t_{fr,med}$, $t_{fr,max}$.



б

 Рисунок 2 – Залежності різниць $\delta_{t,10}$ і $\delta_{t,40}$ від критичної температури θ_{cr} для варіантів № 1 (а) і № 2 (б)

Із порівняння даних щодо різниць $\delta_{t,10}$ і $\delta_{t,40}$ (табл. 6–9), отриманих для варіантів № 1 і № 2, випливає, що застосування як показника для визначення

проміжку часу збереженості вогнестійкості сталеві конструкції коригованої критичної температури, розрахованої за формулою (2), призводить до збільшення похибки

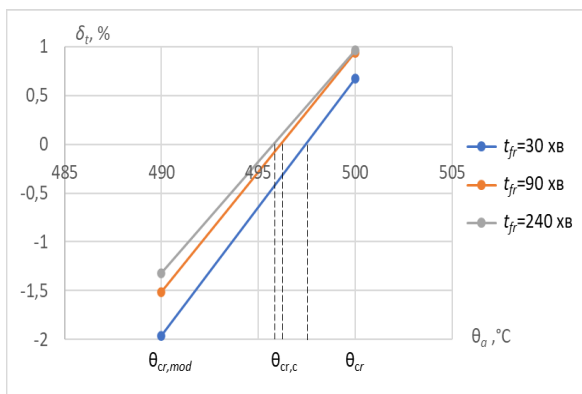
визначення цього проміжку часу відносно показника щодо досягнення критичної температури. Максимальна величина похибки (за модулем) для варіанта № 1 складає 3,67%, в той час як для варіанта № 2 вона дорівнює 9,67%. Отже, застосовувати кориговану критичну температуру, розраховану за формулою (2), як показник для визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевій конструкції не можна.

Слід зауважити, що у разі початкової температури, меншої за номінальну $\theta_{0,nom} = 20^\circ\text{C}$, для варіанта № 1 розрахунковий проміжок часу збереженості вогнестійкості є більшим за його номінальне (умовно точне) значення t_{fr} , а для варіанта № 2 – є меншим за нього. Для початкової температури, більшої за номінальну $\theta_{0,nom} = 20^\circ\text{C}$, для варіанта № 1 цей розрахунковий проміжок часу є меншим, ніж t_{fr} , а для варіанта № 2 – більшим за нього. Із зазначеного випливає, що для визначення значення проміжку часу

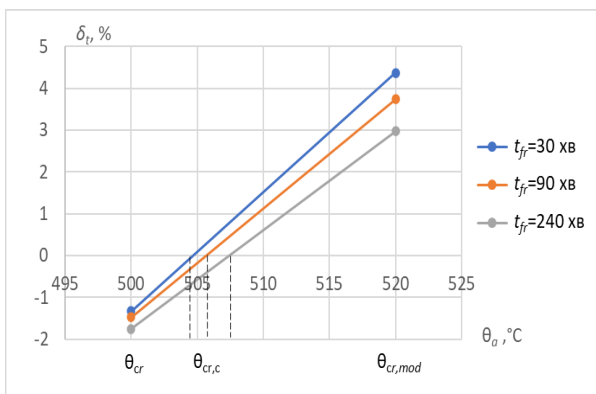
збереженості вогнестійкості сталевій конструкції, яке є найбільш наближеним до номінального значення t_{fr} , необхідне застосування показника, яким є проміжок часу до досягнення коригованої критичної температури $\theta_{cr,c}$, що перебуває в діапазоні від $\theta_{cr,mod}$ до θ_{cr} і яку визначають за формулою (5). На рис. 3, як приклад, наведено залежності різниці δ_t від температури сталі θ_a , яка має місце для проміжку часу t_{fr} збереженості вогнестійкості сталевій конструкції за номінальної початкової температури. Для побудови цих залежностей використано дані щодо середніх значень різниць $\delta_{t,10}$ і $\delta_{t,40}$ (табл. 6–9) для критичної температури $\theta_{cr,med}$ і проміжків часу $t_{fr,min}$, $t_{fr,med}$, $t_{fr,max}$. Температура $\theta_{cr,c}$ дорівнює температурі сталі θ_a , за якої різниця $\delta_t = 0$ (див. рис. 3).

$$\theta_{cr,c} = \theta_{cr} + \Delta, \quad (5)$$

де Δ – різниця між температурою $\theta_{cr,c}$ і критичною температурою θ_{cr} , значення якої перебуває від 0 до $(\theta_{cr,mod} - \theta_{cr})$, $^\circ\text{C}$



а



б

 Рисунок 3 – Залежності різниці δ_t від температури сталі θ_a для $\theta_{0,min}$ (а) і $\theta_{0,max}$ (б)

За допомогою розв'язання прямої задачі теплопровідності для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму і застосованого під час розрахунків діапазону параметрів сталевій конструкції з одношаровою системою вогнезахисту визначали дані щодо температури сталі θ_a , яка має місце для проміжку часу t_{fr} за різних значень початкової температури θ_0 (мінімально допустимого $\theta_{0,min} = 10^\circ\text{C}$ і максимально

допустимого $\theta_{0,max} = 40^\circ\text{C}$). За отриманими даними щодо цієї температури сталі й формулами (6) і (7) визначали різниці Δ_{10} і Δ_{40} , значення яких наведено в табл. 10–11.

$$\Delta_{10} = \theta_{a,10} - \theta_{cr}; \quad (6)$$

$$\Delta_{40} = \theta_{a,40} - \theta_{cr}, \quad (7)$$

де Δ_{10} – різниця між температурою $\theta_{cr,c}$ і критичною температурою θ_{cr} за мінімально допустимої початкової температури $\theta_{0,min} = 10^\circ\text{C}$, $^\circ\text{C}$;

Δ_{40} – різниця між температурою $\theta_{cr,c}$ і

критичною температурою θ_{cr} за максимально допустимої початкової температури $\theta_{0,max} = 40$ °C, °C;

$\theta_{a,10}$ – температура сталі для проміжку часу t_{fr} за мінімально допустимої початкової температури, °C;

$\theta_{a,40}$ – температура сталі для проміжку часу t_{fr} за максимально допустимої початкової температури, °C.

Із аналізу даних, наведених у табл. 10 і 11, випливає, що для застосованого під час розрахунків діапазону параметрів захищеної сталеві конструкції значення різниць Δ_{10} і Δ_{40} змінюється від –0,28 % до –6,74 % і від 0,73 % до 12,56 %, відповідно. Існує їхня залежність від критичної температури θ_{cr} і проміжку часу t_{fr} . З підвищенням θ_{cr} і зниженням t_{fr}

різниці Δ_{10} і Δ_{40} зменшуються (за моделлю), що показано на рис. 4. Цей рисунок побудовано за даними щодо середніх значень, які мають різниці Δ_{10} і Δ_{40} для критичних температур $\theta_{cr,min}$, $\theta_{cr,med}$, $\theta_{cr,max}$ і проміжків часу $t_{fr,min}$, $t_{fr,med}$, $t_{fr,max}$ (див. табл. 10–11). Кореляція між різницями $\delta_{t,10}$ і $\delta_{t,40}$ та коефіцієнтами поперечного перерізу A_p/V і теплопровідності λ_p вогнезахисного матеріалу не спостерігається. Значення стандартного відхилення для Δ_{10} і Δ_{40} є незначним (від 0,09 °C до 0,87 °C). Це обґрунтовує застосування середніх значень різниць Δ_{10} і Δ_{40} у розрахунках надалі.

Таблиця 10 – Дані щодо різниці Δ_{10}

A_p/V , м ⁻¹	λ_p , Вт/(м·°C)	Значення різниці Δ_{10} (у °C) 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	–4,15	–2,62	–	–4,61	–2,92	–0,92	–5,01	–3,43	–1,28
150	0,02	–3,95	–2,17	–0,39	–4,66	–2,92	–0,85	–5,08	–3,46	–1,28
300	0,02	–3,97	–2,12	–0,28	–4,64	–2,95	–1,08	–6,74	–3,67	–1,38
40	0,2	–4,14	–2,61	–	–4,65	–2,98	–0,92	–5,12	–3,50	–1,31
150	0,2	–4,06	–2,25	–0,41	–4,85	–3,09	–0,92	–5,59	–3,90	–1,43
300	0,2	–4,28	–2,38	–0,33	–5,05	–3,36	–1,10	–5,82	–4,19	–1,69
40	2,0	–4,31	–2,73	–	–4,91	–3,13	–1,00	–5,49	–3,83	–1,50
150	2,0	–4,56	–2,62	–0,49	–5,43	–3,61	–1,23	–6,06	–4,49	–2,07
300	2,0	–4,85	–2,81	–0,53	–5,81	–3,96	–1,44	–6,27	–4,80	–2,45
Середнє значення		–4,25	–2,48	–0,41	–4,96	–3,21	–1,05	–5,69	–3,92	–1,60
Стандартний відхил		0,29	0,25	0,09	0,41	0,36	0,19	0,59	0,48	0,41

Таблиця 11 – Дані щодо різниці Δ_{40}

A_p/V , м ⁻¹	λ_p , Вт/(м·°C)	Значення різниці Δ_{40} (у °C) 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	8,41	5,30	–	9,33	5,93	1,85	10,15	6,94	2,55
150	0,02	8,06	4,42	0,75	9,40	5,94	1,74	10,46	7,19	2,56
300	0,02	8,06	4,36	0,73	9,33	6,14	1,65	10,49	7,71	2,72
40	0,2	8,40	5,28	–	9,42	6,06	1,86	10,34	7,06	2,61
150	0,2	8,24	4,54	0,80	9,80	6,28	1,85	11,07	7,79	3,02
300	0,2	8,44	4,60	0,75	10,5	6,75	2,12	11,60	8,51	3,59
40	2,0	8,72	5,51	–	9,91	6,34	2,02	11,05	7,71	2,98
150	2,0	9,17	5,86	0,99	10,82	7,23	2,41	12,16	8,95	4,10
300	2,0	9,68	5,83	1,03	11,34	7,84	2,97	12,57	9,43	4,70
Середнє значення		8,58	5,08	0,84	9,98	6,50	2,05	11,10	7,92	3,20
Стандартний відхил		0,54	0,60	0,13	0,74	0,65	0,41	0,85	0,87	0,77

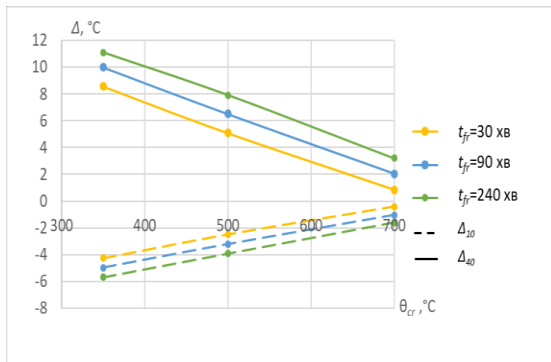


Рисунок 4 – Залежності різниці Δ_{10} (1) і Δ_{40} (2) від критичної температури θ_{cr} для різних проміжків часу t_{fr}

Для апроксимації отриманих розрахункових даних щодо різниці Δ , наведених у табл. 10 і 11, здійснено лінійний числовий регресійний аналіз із застосуванням такого рівняння:

$$\Delta = a_0 + a_1\theta_0 + a_2\theta_0 t_{fr} + a_3\theta_{cr} + a_4\theta_0\theta_{cr} + a_5\theta_0 t_{fr}\theta_{cr} + a_6 t_{fr}\theta_{cr} + a_7 t_{fr}, \quad (8)$$

де a_0 – a_7 – коефіцієнти регресії.

Розв'язуючи рівняння регресії (8) за даними щодо середніх значень різниці Δ , наведеними в табл. 12, із застосуванням програми для роботи з електронними таблицями Microsoft Excel, визначено значення коефіцієнтів регресії, які наведено в табл. 13. У таблиці 12 також зазначено розрахункові значення різниці Δ_{cal} , отримані за рівнянням (8) із використанням визначених коефіцієнтів регресії, відхилю між різницями Δ_{cal} і Δ та температури $\theta_{cr,c}$, розрахованої за формулою (6).

Таблиця 12 – Дані для розрахунку коефіцієнтів регресії

$\theta_0, ^\circ\text{C}$	$\theta_{cr}, ^\circ\text{C}$	$t_{fr}, \text{хв}$	$\Delta, ^\circ\text{C}$	$\Delta_{cal}, ^\circ\text{C}$	$(\Delta_{cal} - \Delta), ^\circ\text{C}$	$\theta_{cr,c}, ^\circ\text{C}$
20	350	30	0,00	0,03	0,03	350,03
20	500	30	0,00	0,02	0,02	500,02
20	700	30	0,00	0,00	0,00	700,00
20	350	90	0,00	0,01	0,01	350,01
20	500	90	0,00	0,01	0,01	500,01
20	700	90	0,00	0,00	0,00	700,00
20	350	240	0,00	-0,03	-0,03	349,97
20	500	240	0,00	-0,01	-0,01	499,99
20	700	240	0,00	0,01	0,01	700,01
10	350	30	-4,25	-4,00	0,25	346,00
10	500	30	-2,48	-2,48	0,00	497,52
10	700	30	-0,41	-0,47	-0,06	699,53
10	350	90	-4,96	-4,35	0,61	345,65
10	500	90	-3,21	-2,82	0,39	497,18
10	700	90	-1,05	-0,77	0,28	699,23
10	350	240	-5,69	-5,24	0,45	344,76
10	500	240	-3,92	-3,64	0,28	496,36
10	700	240	-1,60	-1,52	0,08	698,48
40	350	30	8,58	8,07	-0,51	358,07
40	500	30	5,08	5,02	-0,06	505,02
40	700	30	0,84	0,94	0,10	700,94
40	350	90	9,98	8,73	-1,25	358,73
40	500	90	6,50	5,65	-0,85	505,65
40	700	90	2,05	1,55	-0,50	701,55
40	350	240	11,10	10,37	-0,73	360,37
40	500	240	7,92	7,24	-0,68	507,24
40	700	240	3,20	3,07	-0,13	703,07

Таблиця 13 – Результати розрахунку коефіцієнтів регресії

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
-16,047	0,8060	0,00067	0,02193	-0,0011	$-1,8 \cdot 10^{-7}$	$4,52 \cdot 10^{-6}$	-0,01414

Із аналізу табл. 12 випливає, що відхил ($\Delta_{cal} - \Delta$) змінюється від $-0,73$ °C до $0,61$ °C, а його середнє значення і стандартний відхил відповідно складають $-0,08$ °C і $0,42$ °C, що свідчить про задовільну збіжність даних щодо різниці Δ_{cal} , отриманих за рівнянням (8), з даними щодо різниці Δ .

Через розв'язання прямої задачі теплопровідності для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму і застосованого у розрахунках діапазону параметрів сталевих конструкцій з одношаровою системою вогнезахисту визначали дані щодо проміжку часу ($t_{fr,10}$

або $t_{fr,40}$), за якого розрахункова температура сталевих конструкцій $\theta_{a,cal}$ з коефіцієнтом поперечного перерізу A_p/V дорівнює коригованій критичній температурі $\theta_{cr,c}$, значення якої наведено в табл. 12, для умов, що початкова температура цієї конструкції дорівнює її мінімально допустимому значенню $\theta_{0,min} = 10$ °C або максимально допустимому значенню $\theta_{0,max} = 40$ °C. За отриманими даними щодо проміжків часу $t_{fr,10}$ і $t_{fr,40}$ та формулами (3) і (4) визначали різниці $\delta_{t,10}$ і $\delta_{t,40}$, значення яких вказано в табл. 14, 15.

Таблиця 14 – Дані щодо різниці $\delta_{t,10}$, визначені із застосуванням температури $\theta_{cr,c}$

A_p/V , M^{-1}	λ_p , Вт/(м·°C)	Різниця $\delta_{t,10}$ (у %) для:								
		$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,max}$
40	0,02	0,67	0,67	—	0,00	-0,11	0,11	-0,21	0,00	0,04
150	0,02	0,00	0,00	0,00	0,22	0,11	-0,11	0,33	0,33	-0,21
300	0,02	0,00	0,00	0,00	0,22	0,11	0,11	0,13	0,08	0,17
40	0,2	0,00	0,00	—	0,22	0,89	0,00	0,00	-0,04	0,13
150	0,2	0,00	0,00	0,00	0,11	0,22	0,00	0,04	0,13	-0,13
300	0,2	0,00	-0,33	0,00	0,11	0,22	0,11	0,58	0,13	-0,04
40	2,0	-0,33	0,00	—	0,67	0,11	0,11	0,04	0,08	0,13
150	2,0	0,00	0,00	0,00	0,33	-0,11	-0,22	0,33	0,33	0,33
300	2,0	0,00	0,00	0,00	0,56	0,56	0,11	0,38	0,21	0,08

Таблиця 15 – Дані щодо різниці $\delta_{t,40}$, визначені із застосуванням температури $\theta_{cr,c}$

A_p/V , M^{-1}	λ_p , Вт/(м·°C)	Різниця $\delta_{t,40}$ (у %) для:								
		$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,max}$
40	0,02	0,67	0,67	—	-0,33	-0,33	0,00	-0,04	0,13	0,29
150	0,02	0,00	0,33	0,00	-0,11	0,00	-0,22	0,33	0,38	0,04
300	0,02	0,00	0,33	0,00	-0,11	0,00	0,00	0,00	-0,04	0,33
40	0,2	0,00	0,00	—	-0,11	0,78	-0,22	0,04	0,04	0,38
150	0,2	0,00	0,00	0,00	-0,33	-0,11	0,00	-0,21	-0,08	-0,08
300	0,2	0,00	-0,33	0,00	-0,44	-0,11	-0,11	0,21	-0,25	-0,21
40	2,0	-0,67	-0,33	—	0,22	-0,22	-0,11	-0,21	-0,08	0,21
150	2,0	-0,33	0,00	0,00	-0,33	-0,44	-0,56	-0,21	-0,33	-0,04
300	2,0	-0,33	-0,33	0,00	-0,44	-0,11	-0,44	-0,29	-0,42	-0,46

Із аналізу даних, наведених у табл. 14, 15, випливає, що значення різниць $\delta_{t,10}$ і $\delta_{t,40}$ змінюється: від $-0,33\%$ до $0,89\%$ – для $t_{fr,10}$, від $-0,67\%$ до $0,78\%$ – для $t_{fr,40}$. Середнє значення для різниці $\delta_{t,10}$ складає $0,11\%$, а для $\delta_{t,40}$ $-0,07\%$. Їхні стандартні відхилення (S_{10} і S_{40}) становлять $0,22\%$ і $0,27\%$ відповідно для $\delta_{t,10}$ і $\delta_{t,40}$. Зазначені розрахункові дані свідчать про те, що визначення проміжку часу, виконане

із застосуванням формули (5), рівняння (8) і коефіцієнтів регресії, наведених у табл. 13, призвело до усунення впливу неоднаковості початкової температури сталевих конструкцій на результати визначення проміжку часу збереженості їхньої вогнестійкості. Відхил розрахункового проміжку часу збереженості вогнестійкості, визначеного за мінімально і максимально допустимих

значень початкової температури сталевих конструкцій, від проміжку часу за номінальної початкової температури не перевищує 0,89%, що є прийнятною точністю для інженерних розрахунків.

Варто зауважити, що результати, отримані в межах цього дослідження, можуть вважатися за доцільні з практичного погляду, тому що дають змогу обґрунтовано підходити до визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості несучих сталевих конструкцій з різною початковою температурою. Під час цього визначення за результатами випробування сталевих конструкцій на вогнестійкість встановлюють проміжок часу до досягнення критичної температури θ_{cr} , розраховують різницю Δ (за рівнянням (8)) і кориговану критичну температуру $\theta_{cr,c}$ (за формулою (5)) та визначають проміжок часу до досягнення цієї коригованої температури, який приймають за проміжок часу збереженості вогнестійкості. З погляду теорії, отримані результати зазначеного дослідження дають змогу стверджувати про виявлення впливу початкової температури таких сталевих конструкцій, як балки і колони з одношаровою системою вогнезахисту, на проміжок часу збереженості їхньої вогнестійкості, для широких діапазонів параметрів цих конструкцій (теплофізичних властивостей застосовного вогнезахисного матеріалу, товщини вогнезахисту, критичної температури і коефіцієнта поперечного перерізу конструкції) і обґрунтування температурного показника для визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості цих конструкцій за несучою здатністю, що є певними перевагами проведеного дослідження. Однак слід зауважити, що результати дослідження отримано для вогнезахисного покриття, що має сталі, незалежні від температури, значення коефіцієнта теплопровідності й питомої об'ємної теплоємності. Насправді, значення цих теплофізичних властивостей для пасивних і реактивних вогнезахисних матеріалів залежать від низки параметрів, зокрема від температури [27]. Крім того,

результати дослідження отримано тільки для одношарової системи вогнезахисту і тільки для стандартного температурного режиму. Зазначене може призвести до наявності відмінностей в отриманих результатах стосовно залежності різниці між коригованою і нормованою критичною температурами та параметрами сталевих конструкцій. Така невизначеність накладає певні обмеження на використання отриманих результатів, що може трактуватися, як недоліки цього дослідження. Неможливість зняти вказані обмеження в межах цієї розвідки зумовлює потенційно цікавий напрям подальших досліджень. Вони, зокрема, можуть бути орієнтовані на виявлення впливу початкової температури на показники щодо проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій, оснащених одно- і багатошаровими системами вогнезахисту, в яких застосовують вогнезахисні покриття зі змінними теплофізичними властивостями, для умов вогневого впливу за різними номінальними температурними режимами. Це дасть змогу підвищити точність визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій будь-якого конструктивного виконання для різних умов їхнього застосування.

Висновки та напрями подальших досліджень. Під час проведення дослідження виявлено закономірності впливу початкової температури таких сталевих конструкцій, як балки і колони з одношаровою системою вогнезахисту, на проміжок часу збереженості їхньої вогнестійкості, для широких діапазонів параметрів цих конструкцій (теплофізичних властивостей застосовного вогнезахисного матеріалу, товщини вогнезахисту, критичної температури і коефіцієнта поперечного перерізу конструкції) і обґрунтовано температурний показник для визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості цих конструкцій за несучою здатністю.

Встановлено, що для застосованого під час розрахунків діапазону параметрів сталевих конструкцій різниця між

значеннями проміжку часу до досягнення нормованої критичної температури, отриманими за мінімально допустимої початкової температури 10 °C і номінальної початкової температури 20 °C, може досягати 2,33%, а різниця між значеннями, отриманими за максимально допустимої початкової температури 40 °C, – 3,67%.

З'ясовано, що застосування як показника для визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій коригованої критичної температури, розрахованої за формулою (2), призводить до збільшення похибки визначення цього проміжку часу щодо показника із досягнення нормованої критичної температури (максимальна величина похибки збільшується з 3,67% до 9,67%). З огляду на це застосування цього показника є неприйнятним.

Встановлено, що для визначення значення проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій, яке є найбільш наближеним до номінального значення, необхідне застосування показника, яким є проміжок часу до

досягнення коригованої критичної температури, яку визначають за формулою (5). Визначено залежність різниці між цією коригованою критичною температурою і нормованою критичною температурою від параметрів сталевих конструкцій. Показано, що у разі застосування цього показника відхил розрахункового проміжку часу збереженості вогнестійкості, визначеного за мінімально і максимально допустимих значень початкової температури сталевих конструкцій, від проміжку часу за номінальної початкової температури не перевищує 0,89%, що є прийнятною точністю для інженерних розрахунків.

Окреслено напрями подальших досліджень, які орієнтовані на виявлення впливу початкової температури на показники щодо проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій, оснащених одно- і багат шаровими системами вогнезахисту, в яких застосовують вогнезахисні покриття зі змінними теплофізичними властивостями, для умов вогневого впливу за різними номінальними температурними режимами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. EN 1993-1-2:2005. Eurocode 3 : Design of steel structures. Part 1–2 : General rules – Structural fire design. European committee for standardization. Management Centre : rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2005 CEN. 78 p.
2. Проектування сталевих конструкцій. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість : ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016 [Чинний з 01.04.2017]. Київ : Мінрегіон України, 2016. 111 с.
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 13381-6:2012 Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Part 6 : Applied protection to concrete filled hollow steel columns. European committee for standardization. Management Centre : Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2012 CEN. 24 p.
5. 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. 76 p.
6. EN 13381-9:2015 Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Part 9 : Applied fire protection systems to steel beams with web openings. European committee for standardization. CEN-CENELEC Management Centre : Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2013 CEN. 40 p.
7. EN 13381-10:2020 Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Part 10 : Applied protection to solid steel bars in tension. European committee for standardization. CEN-CENELEC Management Centre : Rue de la Science 23, B-1040 Brussels. 2020 CEN. 31 p.
8. EN 13381-1:2014 Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Part 1 : Horizontal protective membranes. European committee for standardization. CEN-CENELEC Management Centre : Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2014 CEN. 47 p.
9. 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. CEN-CENELEC Management Centre : Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2014 CEN. 35 p.
10. EN 16623:2015 Paints and varnishes – Reactive coatings for fire protection of metallic substrates – Definitions, requirements, characteristics and marking. CEN-CENELEC Management Centre : Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2015 CEN. 42 p.
11. 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.
12. Egle Rackauskaite, Panagiotis Kotsovinos, Ann Jeffers, Guillermo Rein. Computational analysis of thermal and structural failure criteria of a multi-storey steel frame exposed to fire. *Engineering Structures*. 2019. Vol. 180. P. 524–543.

13. Kuo-Chen Yang, Hung-Hsin Lee, Olen Chan. Experimental study of fire-resistant steel H-columns at elevated temperature. *Journal of Constructional Steel Research*. 2006. Vol. 62. P. 544–553.
14. Shenggang Fan, Liyuan Zhang, Wenjun Sun, Xiaofeng Ding, Meijing Liu. Numerical investigation on fire resistance of stainless steel columns with square hollow section under axial compression. *Thin-Walled Structures*. 2016. Vol. 98. P. 185–195.
15. Anil Agarwal, Lisa Choe, Amit H. Varma. Fire design of steel columns : Effects of thermal gradients. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014. Vol. 93. P. 107–118.
16. Harbi Daud, Sultan A Daud, Adel A. Al-Azzawi. Thermal Behavior of Hollow and Solid Steel Beams with Different Boundary Conditions. *CAMES*. 2021. Vol. 28(3). P. 171–191.
17. Élio Maia, Carlos Couto, Paulo Vila Real, Nuno Lopes. Critical temperatures of class 4 cross-sections. *Journal of Constructional Steel Research*. 2016. Vol. 121. P. 370–382.
18. Chao Zhang, Lisa Choe, Mina Seif, Zhe Zhang. Behavior of axially loaded steel short columns subjected to a localized fire. *Journal of Constructional Steel Research*. 2015. Vol. 111. P. 103–111.
19. Jingjie Yang, Weiyong Wang, Yu Shi, Lei Xu. Experimental study on fire resistance of cold-formed steel built-up box columns. *Thin-Walled Structures*. 2020. Vol. 147. P. 106564.
20. Luis Laim, Hélder D. Craveiro, Rui Simões, André Escuder, Alexandre Mota. Experimental analysis of cold-formed steel columns with intermediate and edge stiffeners in fire. *Thin-Walled Structures*. 2020. Vol. 146. P. 106481.
21. I. Cabrita Neves. The critical temperature of steel columns with restrained thermal elongation. *Fire Safety Journal*. 1995. Vol. 24. P. 211–227.
22. J. P. Correia Rodrigues, I. Cabrita Neves, J. C. Valente. Experimental research on the critical temperature of compressed steel elements with restrained thermal elongation. *Fire Safety Journal*. 2000. Vol. 35. P. 77–98.
23. Peijun Wang, Yong-Chang Wang, Guo-Qiang Li. A new design method for calculating critical temperatures of restrained steel column in fire. *Fire Safety Journal*. 2010. Vol. 45. P. 349–360.
24. Tian-Yi Song, Wen-Chuan Yu, Kai Xiang, Hong-Yuan Zhou. Critical temperatures of concrete-filled steel tubular columns for early-warning of fire-induced failure. *Journal of Constructional Steel Research*. 2022. Vol. 191. P. 107190.
25. Новак С., Дріжд В., Добростан О., Новак М. Вплив теплофізичних властивостей вогнезахисних матеріалів на тепловий стан сталевих колон за стандартного температурного режиму. *Науковий вісник : Цивільний захист та пожежна безпека*. 2022. № 1(13). С. 88–110.
26. EN 1991-1-2:2002. Eurocode 1 : Actions on structures. Part 1–2 : General actions – Actions on structures exposed to fire. European committee for standardization. Management Centre : rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2002 CEN. 59 p.
27. Круковский П., Новак С., Поклонский В., Еременко С., Фролов Г. *Оценка огнестойкости металлических строительных конструкций и огнезащитной способности покрытий (расчетно-экспериментальный подход)* : коллективная монография. Киев : Франко Пак, 2021. 148 с.

REFERENCES

1. EN 1993-1-2:2005. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1–2: General rules – Structural fire design. European committee for standardization. Management Centre: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2005 CEN. 78 p. [in English].
2. *Proektuvannia stalevykh konstrukttsii. Rozrakhunok konstrukttsii na vohnestiikist* [Design of steel structures. Calculation of structures for fire resistance]. (2016). DSTU-N B V.2.6-211:2016 from 1st april 2017. Kyiv: Minrehion Ukrainy [in Ukrainian].
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 13381-6:2012 Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Part 6: Applied protection to concrete filled hollow steel columns. European committee for standardization. Management Centre: Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2012 CEN. 24 p. [in English].
5. 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. 76 p. [in English].
6. EN 13381-9:2015 Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Part 9: Applied fire protection systems to steel beams with web openings. European committee for standardization. CEN-CENELEC Management Centre: Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2013 CEN. 40 p. [in English].
7. EN 13381-10:2020 Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Part 10: Applied protection to solid steel bars in tension. European committee for standardization. CEN-CENELEC Management Centre: Rue de la Science 23, B-1040 Brussels. 2020 CEN. 31 p. [in English].
8. EN 13381-1:2014 Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Part 1: Horizontal protective membranes. European committee for standardization. CEN-CENELEC Management Centre: Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2014 CEN. 47 p. [in English].
9. 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. CEN-CENELEC Management Centre: Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2014 CEN. 35 p. [in English].
10. EN 16623:2015 Paints and varnishes – Reactive coatings for fire protection of metallic substrates – Definitions, requirements, characteristics and marking. CEN-CENELEC Management Centre: Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2015 CEN. 42 p. [in English].
11. 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].
12. Egle Rackauskaite, Panagiotis Kotsovinos, Ann, Jeffers, Guillermo, Rein. Computational analysis of thermal and structural failure criteria of a multi-storey steel frame exposed to fire. *Engineering Structures*. 2019. Vol. 180. P. 524–543. [in English].
13. Kuo-Chen, Yang, Hung-Hsin, Lee, Olen, Chan. Experimental study of fire-resistant steel H-columns at elevated temperature. *Journal of Constructional Steel Research*. 2006. Vol. 62. P. 544–553. [in English].
14. Shenggang, Fan, Liyuan, Zhang, Wenjun, Sun, Xiaofeng, Ding, Meijing, Liu. Numerical investigation on fire resistance of stainless steel columns with square hollow section under axial compression. *Thin-Walled Structures*. 2016. Vol. 98. P. 185–195. [in English].
15. Anil, Agarwal, Lisa, Choe, Amit H., Varma. Fire design of steel columns: Effects of thermal gradients. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014. Vol. 93. P. 107–118. [in English].
16. Harbi, Daud, Sultan, A Daud, Adel A., Al-Azzawi. Thermal Behavior of Hollow and Solid Steel Beams with Different Boundary Conditions. *CAMES*. 2021. Vol. 28(3). P. 171–191. [in English].

17. Élio, Maia, Carlos, Couto, Paulo, Vila Real, Nuno, Lopes. Critical temperatures of class 4 cross-sections. *Journal of Constructional Steel Research*. 2016. Vol. 121. P. 370–382. [in English].
18. Chao, Zhang, Lisa, Choe, Mina, Seif, Zhe, Zhang. Behavior of axially loaded steel short columns subjected to a localized fire. *Journal of Constructional Steel Research*. 2015. Vol. 111. P. 103–111. [in English].
19. Jingjie, Yang, Weiyong, Wang, Yu, Shi, Lei, Xu. Experimental study on fire resistance of cold-formed steel built-up box columns. *Thin-Walled Structures*. 2020. Vol. 147. P. 106564. [in English].
20. Luis, Laím, Hélder, D. Craveiro, Rui, Simões, André, Escuder, Alexandre, Mota. Experimental analysis of cold-formed steel columns with intermediate and edge stiffeners in fire. *Thin-Walled Structures*. 2020. Vol. 146. P. 106481. [in English].
21. I. Cabrita, Neves. The critical temperature of steel columns with restrained thermal elongation. *Fire Safety Journal*. 1995. Vol. 24. P. 211–227. [in English].
22. J. P., Correia, Rodrigues, I. Cabrita, Neves, J. C., Valente. Experimental research on the critical temperature of compressed steel elements with restrained thermal elongation. *Fire Safety Journal*. 2000. Vol. 35. P. 77–98. [in English].
23. Peijun, Wang, Yong-Chang, Wang, Guo-Qiang, Li. A new design method for calculating critical temperatures of restrained steel column in fire. *Fire Safety Journal*. 2010. Vol. 45. P. 349–360. [in English].
24. Tian-Yi, Song, Wen-Chuan, Yu, Kai, Xiang, Hong-Yuan Zhou. Critical temperatures of concrete-filled steel tubular columns for early-warning of fire-induced failure. *Journal of Constructional Steel Research*. 2022. Vol. 191. P. 107190. [in English].
25. Novak, S., Dridzh, V., Dobrostan, O., Novak, M. (2022). Vplyv teplofizychnykh vlastyvostei vohnezakhysnykh materialiv na teplovyy stan stalevykh kolon za standartnoho temperaturnoho rezhymu [Influence of thermophysical characteristics of fire-retardant materials on the thermal state of steel columns under standard temperature regime]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*. 1 (13), 88–110. [in Ukrainian].
26. EN 1991-1-2:2002. Eurocode 1: Actions on structures. Part 1–2: General actions – Actions on structures exposed to fire. European committee for standardization. Management Centre: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2002 CEN. 59 p. [in English].
27. Krukovskij P., Novak S., Poklonskij V., Eremenko S., Frolov G. Ocenka ognestojkosti metallicheskih stroitel'ny'kh konstrukcij i ognезashhitnoj sposobnosti pokry'tij (raschetno-e'ksperimental'ny'j podkhod) [Evaluation of the fire resistance of metal construction structures and the fire protection ability of the coated (calculation-experimental approach)]: *kollektivnaya monografiya*. Kiev: Izdatel'stvo Franko Pak, 2021. 148 s. [in Russian].

DETERMINATION OF THE TIME PERIOD OF PRESERVATION OF FIRE RESISTANCE OF LOAD-BEARING STEEL STRUCTURES WITH DIFFERENT INITIAL TEMPERATURES

S. Novak¹, O. Dobrostan¹, M. Pustovy²

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

²*Cherkasy Institute of Fire Safety named after Heroes of Chornobyl of the National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine*

KEYWORDS

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

ANNOTATION

This study is devoted to the determination of the time interval of preservation of fire resistance of load-bearing steel structures without an enclosing function, which have different initial temperatures during the test. It aimed to identify the influence of the initial temperature of steel structures such as beams and columns with a single-layer fire protection system on the time period of their fire resistance preservation, for a wide range of parameters of these structures (thermophysical properties of the applicable fire protection material, fire protection thickness, critical temperature and cross-section coefficient structures) and substantiation of the temperature indicator for determining the time interval of preservation of the fire resistance of these structures according to the bearing capacity. It was found that for the range of parameters of the steel structure used in the calculations, the difference between the values of the time interval until the normalized critical temperature is reached, obtained at the minimum permissible initial temperature of 10 °C and the nominal initial temperature of 20 °C, can reach 2.33%, and the difference between the values, obtained at the maximum permissible initial temperature of 40 °C and nominal initial temperature of 20 °C, can reach 3.67%. It was established that in order to determine the value of the time interval of preservation of the fire resistance of the steel structure, which is the closest to the nominal value, it is necessary to use the indicator, which is the time interval until the corrected critical temperature is reached. The dependence of the difference between this corrected critical temperature and the normalized critical temperature on the parameters of the steel structure was determined. It is shown that in the case of applying this indicator, the deviation of the calculated interval of time of preservation of fire resistance, determined for the minimum and maximum permissible values of the initial temperature of the steel structure, from the interval of time at the nominal initial temperature does not exceed 0.89%, which is an acceptable accuracy for engineering calculations.

УДК 614.841.45

ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ КРИТЕРІЇВ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ БЕЗПІЛОТНИХ АВІАЦІЙНИХ СИСТЕМ В ОПЕРАЦІЯХ ІЗ ЛІКВІДАЦІЇ ПОЖЕЖ В ЕКОЛОГІЧНИХ СИСТЕМАХ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2.22-31>

Хижняк В. В.*, ORCID iD 0000-0003-0437-749X

Шевченко В. Л., ORCID iD 0000-0002-8360-0217

*E-mail: ndc.avia@gmail.com

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції:

24.07.2023

Пройшла рецензування:

15.08.2023

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

безпілотна авіаційна система, безпілотний літальний апарат, пожежі в екосистемах, повітряний пошук і моніторинг.

АНОТАЦІЯ

Послідовники світової практики боротьби з пожежами в екологічних системах, орієнтуючись на інтенсивний розвиток і розширення сфер застосування безпілотних авіаційних систем (далі – БАС), шукають шляхи ефективної реалізації їх зростаючого потенціалу, а також нормативно-організаційні підходи щодо застосування в єдиній авіаційній системі разом із пілотованими повітряними суднами. На сьогодні у контексті виникнення надзвичайної ситуації, пов'язаної з пожежами в екосистемах, БАС здатні здійснювати повітряну розвідку, контролювати та фіксувати поточні параметри, оперативно передавати відеоматеріали палаючого осередку та тенденції його розвитку. Крім цього, застосування БАС дає можливість визначити напрямок і швидкість поширення вогню, динаміку зміни конфігурації палаючої крайки, визначати найкоротші та безпечні маршрути висунання аварійно-рятувальних команд, а також відстань до найближчих населених пунктів, яким загрожує лісова пожежа. Для оцінювання ефективності БАС, які належать до складних технічних засобів, мають застосовуватись методологічні підходи, які узгоджуються з визнаними поглядами на загальну теорію ефективності складних систем. У роботі обґрунтовано критерії та показники, що характеризують ефективність застосування різних зразків БАС під час виконання завдань ДСНС в операціях з ліквідації пожеж в екологічних системах. Запропоновані критерії та показники ефективності застосування БАС дають змогу сформувати множину ефективних альтернативних варіантів БАС, спроможних вирішувати завдання, визначені для авіації ДСНС з ліквідації пожеж в екологічних системах, з подальшим вибором серед них оптимального поєднання характеристик та варіанта БАС. Аналіз та порівняння показників ефективності застосування різноманітних БАС для розв'язання однотипних завдань в інтересах ДСНС дають змогу суттєво підвищити оперативність отримання необхідної інформації для ухвалення своєчасних управлінських рішень відповідними органами у процесі планування та виконання операцій з ліквідації пожеж в екосистемах.

Постановка проблеми. Серед усіх типів наземних природних екосистем найбільш поширеними є ліси. Запас рослинної маси в лісах становить 82% фітомаси Землі, а сукупний запас деревини перевищує 300 млрд м³. На сучасному етапі розвитку суспільства виникає все більше протиріч між людиною і природою. Посилення ненормованого рекреаційного навантаження на ліси після пригнічення у

разі вирубування призводить до другого глобального чинника їх знищення – зростання кількості та збільшення масштабів лісових пожеж. Лісові пожежі зумовлюють виникнення стихійних лих, катастроф і надзвичайних ситуацій, наслідки яких можуть бути жахливими [1].

В Україні кожна третя пожежа виникає у природних екосистемах, а це в середньому понад 27 тис. пожеж на рік

загальною площею понад 25 тис. га (див. рис. 1–2) [2].

Що ж до лісових пожеж, то Україна вважалася відносно благополучною країною. За даними ФАО (Food and Agriculture Organization – Продовольча та сільськогосподарська організація ООН), річна площа пожеж останніми роками в Україні у перерахунку на один гектар лісових земель була однією з найнижчих у східноєвропейському регіоні [3–4]. Це підтверджує високий рівень ефективності охорони лісів від пожеж.



Рисунок 1 – Кількість лісових пожеж [2]



Рисунок 2 – Площа лісових пожеж [2]

Однак річна кількість лісових пожеж в Україні останніми роками збільшувалася, що, як уже зазначалося, є загальносвітовою тенденцією і відображає посилення антропогенного впливу на ліси та може бути результатом глобальних змін клімату [5]. Водночас, за оцінками фахівців із Німеччини, Франції, Англії, які ознайомлювалися із системою охорони лісів від пожеж в Україні, технічне забезпечення ліквідації лісових пожеж є на незадовільному рівні. Недостатнім також є рівень співпраці та

взаємодії між лісовою пожежною охороною та регіональними підрозділами ДСНС України.

Світовий досвід свідчить про інтенсивне зростання ролі та поширення переліку завдань, які покладаються на парк БАС у складі єдиної авіаційної компоненти ДСНС у системі запобігання та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій (далі – НС) [6]. А досвід застосування авіації ДСНС за двадцять років свідчить, що найбільш масштабними НС, коли авіація здійснювала забезпечення дій наземних сил, були НС, пов'язані з гасінням пожеж у природних екосистемах (лісах, степах та торфовищах), і евакуація постраждалих із місць НС.

Водночас ці надзвичайні ситуації для авіації ДСНС України є і найбільш складними, оскільки потребують масованого застосування сил і засобів у обмежений час, чіткої взаємодії, якісного управління та всебічного забезпечення.

В авіації ДСНС для боротьби з пожежами створено спеціальний протипожежний підрозділ у складі Спеціального авіаційного загону Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту (м. Ніжин), повітряні судна якого – літаки «Ан-32П» та вертольоти «Ми-8МТ», «СС225LP – Super Puma» з водозливними пристроями ВЗП-3, ВЗП-5 – успішно застосовуються для гасіння лісових пожеж не тільки на території нашої держави, а й за кордоном [7].

З огляду на зазначене БАС на сьогодні не є основним технічним засобом для прогнозування та проведення відповідних заходів щодо попередження і ліквідації НС, зокрема в екосистемах.

Однак нові виклики для авіації ДСНС, пов'язані зі зростанням на території України кількості пожеж в екосистемах, потребують і адекватної реакції щодо швидкої їх локалізації та своєчасної ліквідації наслідків, що може бути здійснено переважно із застосуванням як пілотованої авіації, так і БАС, зокрема для оперативного або цілодобового моніторингу природних

екосистем і технологічних об'єктів із високим ризиком.

БАС вважаються досить перспективними засобами для виконання завдань у сфері цивільного захисту стосовно одноманітної, брудної або небезпечної діяльності, тобто розв'язання яких пов'язане з монотонністю або небезпекою для пілота повітряного судна. Практичний досвід застосування БАС провідними країнами світу виявив широкий набір цивільних завдань, під час вирішення яких безпілотники показують високу ефективність [6].

За прогнозом компанії «Teal Group» (США) від 2019 р., у найближчі десять років найбільшими ринками для цивільних БАС будуть моніторинг нафто- та газопроводів, охорона прикордонної території та лісове господарство, тобто види діяльності, де потрібен регулярний моніторинг значних площинних і лінійних об'єктів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Фахівці, які досліджують пожежі в екосистемах на глобальному рівні, зазначають, що на найближчу перспективу слід очікувати збільшення кількості пожеж. В основі таких прогнозів лежать повідомлення урядів багатьох країн про катастрофічні пожежі та збитки, завдані ними [4].

За досвідом цих країн, значні лісові пожежі можуть тривати довго, і навіть розвинені в технологічному плані держави часом не можуть ефективно протистояти цій стихії. У країнах із надзвичайно посушливим та спекотним літом (південь США, деякі країни Центральної та Латинської Америки, Середземномор'я, Західної Європи) кількість лісових пожеж, що одночасно відбуваються, іноді становить не один десяток.

Ідея застосування авіаційних сил і засобів для виявлення пожеж у природних екосистемах уперше виникла у Сполучених Штатах Америки на початку минулого сторіччя. Однак практично її реалізувати вдалося лише у двадцятих роках, коли федеральний уряд передав декілька повітряних суден лісовій службі

(U.S. Forest Service) для моніторингу пожеж у лісах штатів Вашингтон, Каліфорнія та Орегон [8].

У Північній Америці в середині ХХ ст. була значна кількість як легких сільськогосподарських, так і важких транспортних літаків. У тридцятих роках минулого століття розроблено понад 50 типів (з модифікацією) пожежних літаків-танкерів [9].

На сьогодні в лісовій галузі України створена і функціонує відомча пожежна охорона, основу якої становлять лісові пожежні станції [2]. Охорону лісів від пожеж забезпечують 311 державних лісових господарських та лісових мисливських підприємств, у складі яких функціонує понад 1,8 тис. лісництв та 263 лісові пожежні станції. Чисельність відомчої пожежної охорони становить понад 14 тис. осіб. У лісах створена мережа з-понад 500 пожежними спостережними вежами, з яких нині 337 обладнано сучасними телевізійними системами спостереження.

Авіаційну охорону лісів покладено на Державне підприємство «Українська державна база авіаційної охорони лісів». Однак на сьогодні авіаційне патрулювання лісових площ практично не здійснюється, що не дає змогу охопити значні території одним літальним апаратом, визначити площі, характер пожежі та відповідно призводить до затримки виявлення пожеж.

Оскільки Україна має значні площі та величезне різноманіття лісів, пріоритетними напрямками слід вважати авіаційну охорону лісів, залучення авіації до ліквідації пожеж у природних екологічних системах, зокрема і формування високомобільних груп пожежників-рятувальників.

Формулювання цілей дослідження. Метою роботи є обґрунтування критеріїв, що характеризують ефективність застосування різних зразків БАС під час виконання завдань ДСНС України в операціях з ліквідації пожеж у природних екологічних системах.

Для досягнення поставленої мети слід:

- сформувати перелік і види робіт, які доцільно виконувати із залученням БАС під час моніторингу та ліквідації пожеж в екосистемах;

- обґрунтувати ймовірності розпізнання об'єкта за виглядом, класом і типом об'єкта як основні показники ефективності моніторингових місій БАС;

- обґрунтувати продуктивність пошуку з урахуванням імовірності невідхилення об'єкта та ймовірності отримання з ним контакту за усіма видами пошуку: контрольного (у районі), на рубежі (на лінії) і за викликом (вторинний);

- для забезпечення заданої ефективності пошуку визначити залежності розрахунку потрібних значень часу пошуку або площі району пошуку.

Методи дослідження. В роботі застосовано сукупність загальнонаукових і спеціальних методів, зокрема: методи експертного оцінювання, метод аналізу ієрархій, методи системного аналізу, методи структурно-функціонального моделювання, методи імітаційного моделювання, методи дослідження операцій.

Виклад основного матеріалу. На сьогодні БАС все більше застосовуються у аерознімальних процесах як недорога альтернатива традиційному аерозніманню з пілотованих повітряних суден та у космічному (супутниковому) зніманні.

Повітряний пошук та моніторинг із застосуванням встановленої на цьому типі БАС різноманітної номенклатури фото-, телевізійної, тепловізійної, інфрачервоної апаратури – це найбільш відома сфера використання БАС. Це за своєю значущістю, оперативністю отримання та наочністю результатів є надзвичайно ефективним інструментом досягнення заданої мети під час виконання пошукових та моніторингових операцій з ліквідації пожеж в екологічних системах.

Створення та впровадження в практику роботи ДСНС сучасних зразків БАС дає змогу суттєво скоротити витрати

на виконання цілої низки завдань, а також позбавляє необхідності застосування пілотованих повітряних суден у ризикованих ситуаціях, пов'язаних насамперед із ліквідацією пожеж в екосистемах [10].

Реальний практичний інтерес для відповідних структурних підрозділів ДСНС України (Департамент запобігання надзвичайним ситуаціям та державного нагляду (контролю), Департамент реагування на надзвичайні ситуації, Департамент організації заходів цивільного захисту, управління авіації та авіаційного пошуку і рятування, управління гідрометеорології тощо), а також Державного агентства України з управління зоною відчуження становлять види робіт, які доцільно виконувати із залученням БАС [11].

Серед них такі:

- авіаційний моніторинг районів ландшафтних степових, лісових і торф'яних пожеж, протипожежних смуг та узлісся, здійснення їх аеро-, фото- та відеознімання;

- проведення пошукових робіт під час виникнення ландшафтних степових, лісових і торф'яних пожеж;

- отримання необхідних відеоданих у реальному часі з місця надзвичайної ситуації для забезпечення організації ліквідації надзвичайної ситуації, інформування керівництва ДСНС України та держави;

- проведення оцінки масштабів ландшафтних степових, лісових і торф'яних пожеж.

Відповідно весь перелік задач, які можливо та доцільно розв'язувати за допомогою БАС, умовно можна поділити на дві групи: пошуку та моніторингу (спостереження). Задачі споріднені за своїм функціоналом та спрямованістю, а також за необхідним складом апаратури на борту безпілотної літальної апаратури (БпЛА) зі складу БАС, але розв'язуються із застосуванням різних тактичних схем виконання польоту та алгоритмів керування.

Здебільшого перед повітряним пошуком та моніторингом ставляться задачі отримання інформації про місцевість та об'єкти не усюди і завжди, а в певному конкретному районі, який визначається на основі інформації, отриманої з додаткових джерел.

Задача повітряного пошуку та моніторингу для БАС зазвичай формулюється як задача суцільного перегляду деякої (зазвичай прямокутної (лісові угіддя), іноді лінійно витягнутої (дорога, узлісся, протипожежні смуги тощо)) ділянки місцевості або елемента інфраструктури з отриманням знімків об'єкта на електронному або іншому матеріальному носії.

Типовий алгоритм повітряного пошуку та моніторингу включає: БпЛА зі складу БАС виконує політ у задані райони під управлінням оператора або за програмою. Під час польоту в заданому районі БпЛА через радіоканал передають інформацію в реальному масштабі часу на наземний пункт управління для її обробки про місцевість і об'єкти на ній.

Для ухвалення обґрунтованих інженерних і управлінських рішень щодо захисту людей та екологічних систем необхідно постійно аналізувати процеси формування вражаючих факторів, знати характеристики небезпечних речовин і джерел, уміти прогнозувати масштаби та наслідки пожеж.

У разі використання БАС зі встановленими на БпЛА цифровими системами можливо здійснювати екологічне патрулювання і моніторинг, фото-, відеоспостереження територій, забезпечувати зв'язком та навігаційною інформацією системи управління особовим складом аварійно-рятувальних команд та системи підтримки ухвалення рішень.

Завдання повітряного пошуку розв'язуються методами застосування одного з видів пошуку: на рубежі (на лінії), контрольного (у районі) і за викликом (вторинний) [11–12].

Пошук на рубежі містить у собі обстеження уздовж заданої протяжної лінії (дороги, узлісся, протипожежної смуги

тощо). Він проводиться тоді, коли є дані про ймовірний напрямок руху (курс) об'єкта і місце його можливого перетинання рубежу. Пошуку на рубежі відповідає рівнопропорційний розподіл ймовірних місць перетинання об'єкта лінії рубежу.

Контрольний пошук містить у собі обстеження заданого району літальним апаратом для виявлення об'єкта або встановлення його відсутності. Він проводиться у разі якщо немає даних на певний момент часу про місце перебування об'єкта. Контрольному пошуку також відповідає рівнопропорційний розподіл ймовірних місць перебування об'єкта у районі, що підлягає обстеженню.

Пошук за викликом містить у собі обстеження місця виявлення об'єкта через певний час після того, як це відбулося. Він проводиться у разі якщо є дані на певний момент часу про місце перебування об'єкта. Пошуку за викликом відповідає нерівномірний розподіл ймовірних місць об'єкта біля точки його первинного виявлення.

Критеріями ефективності пошуку є продуктивні та ймовірнісні показники.

Зазвичай продуктивними показниками пошуку вважаються теоретична та реальна продуктивності та відношення реальної до теоретичної продуктивності пошуку.

Ймовірнісними показниками пошуку є ймовірність виявлення об'єкта до заданого терміну, математичне сподівання числа об'єктів, виявлених до заданого терміну, і математичне сподівання часу, необхідного для виявлення об'єкта (середній час, що очікується для виявлення об'єкта).

У разі припущення максимальної ефективності пошуку ширина смуги обстеження БпЛА дорівнює:

$$Ш_{н.о.} = 2E_{об} \quad (1)$$

де $E_{об}$ – математичне сподівання дальності дії технічного засобу виявлення, що є на борту БпЛА, (середня дальність виявлення, що очікується).

Зважаючи на це, теоретична продуктивність пошуку W_T дорівнює

$$W_T = \Pi_{n.o.} V_{noid} \quad (2)$$

де V_{noid} – середня відносна швидкість польоту БПЛА.

Водночас середня відносна швидкість польоту БПЛА буде визначатися, як:

$$V_{noid} = k_V (V_n + V_{об}) \quad (3)$$

де k_V – коефіцієнт швидкості (вибирається з табл. 1);

V_n і $V_{об}$ – швидкості польоту БПЛА і переміщення об'єкта відповідно.

Таблиця 1 – Значення коефіцієнта швидкості [13]

$V_n/V_{ц}$	k_V	$V_n/V_{ц}$	k_V
0,00	1,00	0,60	0,68
0,10	0,91	0,70	0,66
0,20	0,84	0,80	0,65
0,30	0,79	0,90	0,64
0,40	0,74	1,00	0,64
0,50	0,71		

Реальна або ефективна продуктивність пошуку W_{ef} дорівнює:

$$W_{ef} = c S_p / N_{ц} t_n \quad (4)$$

де c – загальне число об'єктів, виявлених за час пошуку;

S_p – площа району пошуку;

$N_{ц}$ – середня кількість об'єктів, що перебували в районі під час пошуку;

t_n – фактична тривалість пошуку БПЛА.

Відносна продуктивність (ВП) дорівнює:

$$ВП = W_{ef} / W_T \quad (5)$$

Імовірність виявлення об'єкта до заданого терміну $P_{об}$ дорівнює:

$$P_{об} = 1 - \exp(-u t_n / S_p) \quad (6)$$

де u – продуктивність пошуку з урахуванням імовірності невідхилення об'єкта $P_{неук}$ та ймовірності отримання з ним контакту $P_{к}$.

Якщо в процесі пошуку об'єкт перетинає район пошуку, то

$$t_n = (\sqrt{D_p^2 + \Pi_p^2}) / 2V_{ц} \quad (7)$$

де D_p і Π_p – довжина і ширина району пошуку відповідно.

$$u = \Pi_{n.o.} V_n P_{неук} P_{к} \quad (8)$$

Імовірність невідхилення об'єкта $P_{неук}$ дорівнює:

$$P_{неук} = (1 - P_{вих})(1 - P_{np}), \quad (9)$$

де $P_{вих}$ – імовірність виходу об'єкта зі смуги пошуку;

P_{np} – імовірність перетинання об'єктом смуги, що переглядається за допомогою БПЛА.

Імовірність виходу об'єкта зі смуги

$$P_{вих} = \begin{cases} 2D_{ук} \operatorname{tg} Q / \Pi_{n.o.} & \text{при } D_{ук} \geq \Pi_{n.o.} \\ 2D_{ук} \operatorname{tg} Q / \Pi_{n.o.} & \text{при } D_{ук} < \Pi_{n.o.} \end{cases} \quad (10)$$

де $D_{ук}$ – відстань початку відхилення об'єкта від БПЛА;

Q – критичний курсовий кут, що визначається, як:

$$Q = \arcsin V_{ц} / V_n \quad (11)$$

$$P_{np} = \Phi(D_{об} / E) \quad (12)$$

де Φ – приведена функція Лапласа, вибрана з таблиць [13];

E – серединна помилка в місці перетинання об'єктом смуги.

Імовірність контакту $P_{к}$ з об'єктом, що потрапив у зону дії засобів спостереження БПЛА, дорівнює:

$$P_{к} = 1 - \exp[-k E_{об} \Omega / (V_n + V_{ц}) T_o] \quad (13)$$

$$k = \pi / 360^0 \cdot 2 = 0.00436 \text{ 1/град:}$$

де Ω – сектор обстеження засобом спостереження БПЛА, град.;

T_o – час обстеження сектора.

Математичне сподівання числа об'єктів $MO_{об}$, виявлених до заданого терміну, дорівнює:

$$MO_{об} = N_{ц1} P_{об1} + N_{ц2} P_{об2} + \dots + N_{цn} P_{обn}^n \\ = \sum_{i=1}^n N_{цi} P_{обi} \quad (14)$$

де $N_{цi}$ – кількість об'єктів, що перебувають в i -ому районі пошуку;

$P_{обi}$ – імовірність виявлення об'єктів в i -ому районі пошуку.

Математичне сподівання часу $T_{об}$, необхідного для виявлення об'єкта

(середній час виявлення об'єкта, який очікується), що визначає час у середньому, який очікується для виявлення об'єкта з моменту початку пошуку, дорівнює:

$$T_{об} = S_p / u. \quad (15)$$

Для забезпечення заданої ефективності пошуку $P_{об.зад}$ необхідно розрахувати потрібні значення часу пошуку або площі району пошуку:

$$t_n = [-\ln(1 - P_{об.зад}) S_p] / u; \quad (16)$$

$$S_p = t_n u / [-\ln(1 - P_{об.зад})].$$

Задача спостереження вирішується за допомогою БПЛА через їх перебування над заданим районом протягом тривалого часу і ведення спостереження за підстильною поверхнею або за наявними в районі спостереження об'єктами (вдень – за допомогою фото- або телекамер, вночі – за допомогою інфрачервоних систем, а в складних метеоумовах – за допомогою радіолокаційної станції міліметрового діапазону або радарів із синтезованою апертурою).

Водночас основним показником ефективності моніторингу (спостереження) є ймовірність розпізнавання $P_{он}$ об'єкта за виглядом $P_{он}^B$, за класом $P_{он}^K$ і за типом $P_{он}^T$ об'єкта:

$$P_{он} = 1 - (1 - P_{зад})(1 - P_{к}) \quad (17)$$

де $P_{зад}$ – задана ймовірність розпізнавання об'єкта за детальністю (за виглядом, класом або типом).

$$P_{зад} = \begin{cases} 0,95 & \text{(для розпізнавання об'єкта за виглядом - } P_{он}^B) \\ 0,90 & \text{(для розпізнавання об'єкта за класом - } P_{он}^K) \\ 0,85 & \text{(для розпізнавання об'єкта за типом - } P_{он}^T); \end{cases} \quad (18)$$

$P_{к}$ – ймовірність контакту з об'єктом, що потрапив у зону дії засобів спостереження БПЛА:

$$P_{к} = 1 - \exp[-k E_{об} \Omega / (V_n + V_u) T_o] \quad (19)$$

Порівняння показників ефективності застосування БАС дає змогу зрозуміти, що для розв'язання задач оперативного пошуку об'єктів та моніторингу пожеж в екосистемах більш доцільним є залучення багатофункціональних БАС, зокрема виробництва авіаційної компанії «Скаетон».

Тактичний безпілотний авіаційний комплекс військового призначення ACS-3 виробництва цієї компанії з 2019 року експлуатується у Збройних Силах України (рис. 3). На зовнішній ринок компанія постачає безпілотні авіаційні системи Raybird-3 [14].



Рисунок 3 – БПЛА ACS-3 в польоті [14]

Максимальна злітна вага БПЛА становить 21 кг, маса цільового спорядження – 5 кг, максимальна дальність польоту – 2 500 км. Крейсерська швидкість БПЛА – 120 км/год,

Характеристики БПЛА ACS-3М

Максимальна дальність польоту, км	2500
Максимальний радіус дії при польоті в програмованому режимі, км	1000
Робота в умовах радіоелектронної протидії (глушіння GPS та каналу управління)	+
Максимальна тривалість польоту, год (підтверджена заводськими випробуваннями з силовою установкою інжекторного типу)	>30
Швидкість максимальна/крейсерська/мінімальна, км/год	160/120/80
Максимальна висота польоту, м (а використанням силової установки інжекторного типу)	4500
Розмах крила/довжина/висота, мм	2985/1830/320
Максимальна злітна маса, кг	23
Силова установка	інжекторний двигун
Витрата палива у крейсерському режимі, кг/год (залежить від аеродинаміки цільового навантаження та особливостей польотного завдання)	0,3
Об'єм паливного бака в штатній версії БПЛА, л	9
Потужність силової установки, к.с.	3
Габарити транспортного контейнера для одного БПЛА, мм	1350x650x450

Рисунок 4 – Характеристики БПЛА ACS-3 [14]

максимальна – 160 км/год, що дає можливість оперативно реагувати на подію чи виконувати будь-яку операцію (див. рис. 4). Інтегральне поєднання у комплексах «Скаетон» швидкості та

тривалості польоту, надійності, захищеності та зручності експлуатації забезпечує перевагу розроблення над аналогами.

Водночас прямих конкурентів за тривалістю польоту за співмірної злітної маси БПЛА від компанії «Скаетон» є лише п'ять. Це американський ScanEagle (Insitu), французький Fulmar X (Thales), ізраїльський Bluebird (Aero Systems), португальський Tekever AR3 (Tekever), латвійський Pengiun B (UAV factory). Проте за показником «ефективність-надійність-вартість» під час виконання споріднених місій польоту перевага буде однозначно на боці української розробки.

Висновки та напрями подальших досліджень. На практиці використовуються різні підходи до оцінки ефективності БАС, адже цільова ефективність – це системна характеристика, яка визначається рамками функціональної операції. Безпосередній опис усієї сукупності дій в багатоетапній операції складний через їх різноманітність і значну кількість елементів системи, що виконують ці дії, тому під час розрахунку виділяються типові складові операції, для кожної з яких розробляються типові математичні моделі.

Для отримання оцінок ефективності використовуються досить широкий арсенал методів, вибір яких у кожному конкретному випадку зумовлений цілями отримання такого роду оцінок і особливостями як функціонування зразка (самостійно або в групі виробів), так і будови самого технічного пристрою. Безумовно, БАС, які належать до складних технічних засобів, не є винятком, і для оцінювання їх ефективності мають застосовуватись методологічні підходи, які узгоджуються з визнаними підходами в

загальній теорії ефективності складних систем.

У роботі обґрунтовано критерії та показники, що характеризують ефективність застосування різних зразків БАС під час виконання завдань ДСНС України в операціях з ліквідації пожеж в екологічних системах. Наведені критерії та показники досить об'єктивно характеризують ступінь технічної досконалості зразків БАС, що порівнюються. Для більш детальної оцінки необхідно формувати групи параметрів, що визначають окремі властивості БАС, за якими можна деталізувати рівень розроблення деяких елементів БАС як складної технічної системи.

Аналіз та порівняння показників ефективності застосування різноманітних БАС для розв'язання однотипних завдань в інтересах ДСНС України вказує на доцільність і необхідність прискореного впровадження в практику діяльності авіаційної компоненти різноманітної номенклатури БАС, що дасть змогу суттєво зекономити ресурси та водночас підвищити оперативність отримання необхідної інформації для ухвалення своєчасних управлінських рішень відповідними органами у процесі планування та виконання операцій з ліквідації пожеж в екосистемах.

На основі запропонованих критеріїв і показників ефективності застосування різних зразків БАС доцільно розробити низку методик порівняльної оцінки БАС, що дасть змогу системно порівнювати технічні характеристики різних БАС, зіставляти їх з витратами на придбання та застосування. Також ці методики можуть використовуватися як засіб підтримки ухвалення рішення під час аналізу відповідності різних варіантів БАС вимогам, що встановлені.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Інформаційно-аналітична довідка про виникнення НС в Україні у 2020 році. URL : <https://komekolog.rada.gov.ua/uploads/documents/36455.pdf> (дата звернення : 15.08.2023).
2. Публічний звіт голови Державного агентства лісових ресурсів України за 2022 рік. URL : <https://forest.gov.ua/publichnii-zvit-za-2022> (дата звернення : 15.08.2023).
3. Fire management – global assessment 2006 : FAO forestry paper. Rome, 2007. Vol. 151. 156 p.
4. Global Forest Resources Assessment 2010 : FAO forestry paper. Rome, 2010. Vol. 163. 378 p.

5. Зібцев С. В. Стан охорони лісів від пожеж в Україні та головні напрямки її покращення. *Науковий вісник НАУ*. 2000. Вип. 25. С. 319–329.
6. Руснак І. С., Ємець В. І., Хижняк В. В. Безпілотна авіація у сфері цивільного захисту України. Стан і перспективи розробки та застосування. *Наука і оборона*. 2014. № 2. С. 34–39.
7. Обґрунтування вимог до перспективних та модернізованих літальних апаратів для авіаційного забезпечення виконання завдань ДСНС, визначення їх необхідного складу, типажу та розміщення по регіонах України : Звіт про науково-дослідну роботу. Київ : УкрНДІПЗ, 2015. 215 с.
8. Stein-Janney T. Airtankers, an historic overview / California Fire Pilots Ass. 2012. 14 p.
9. Баскакова А. О., Воронов М. А., Крамаренко Ю. А. История авиационной охраны лесов России. Пушкино : Авиалесоохрана, 2017. 294 с.
10. Литовченко А. О., Хижняк В. В., Ядченко Д. М. Підвищення спроможностей авіації ДСНС України за рахунок територіального базування безпілотних авіаційних систем відповідно до регіональних оцінок природно-техногенного навантаження : матеріали 22 Всеукр. наук.-практич. конф. (за міжнар. участю), м. Київ, 27 жовт. 2021. Київ, 2021. С. 100–106.
11. Застосування безпілотних авіаційних систем у сфері цивільного захисту : колективна монографія / Д. В. Бондар та ін. Київ : ІДУНДІПЗ, 2022. 312 с.
12. Лещенко Г. А., Мандрик Я. С., Стратонов В. М., Давидов С. А. Способи застосування безпілотних літальних апаратів під час авіаційного пошуку і рятування. *Наукоємні технології*. 2021. № 3(51). С. 271–280.
13. Абезгауз Г. Г., Тронь А. П., Копенкин Ю. Н., Коровина И. А. Справочник по вероятностным расчетам. М. : Воениздат, 1970. 536 с.
14. Рекордний політ українського безпілотника компанії «Скаетон» : Аерокосмічний портал. URL : <https://space.com.ua/2019/07/01/rekordnij-polit-ukrayinskogo-bezpilotnika-kompaniyi-Skaeton> (дата звернення : 15.04.2023).

REFERENCES

1. Informatsijno-analitychna dovidka pro vynyknennia NS v Ukraini u 2020 rotsi (2020). Retrieved from <https://komekolog.rada.gov.ua/uploads/documents/36455.pdf> [in Ukrainian].
2. Publichnyj zvit holovy Derzhavnoho ahentstva lisovykh resursiv Ukrainy za 2022 rik (2022). Retrieved from <https://forest.gov.ua/publichnii-zvit-za-2022> [in Ukrainian].
3. FAO forestry paper. (2007). *Upravlinnia pozhezhamy – hlobal'na otsinka 2006* [Fire management – global assessment 2006]. Rome [in English].
4. FAO forestry paper. (2010). *Hloba'lna otsinka lisovykh resursiv 2010* [Global Forest Resources Assessment 2010]. Rome [in English].
5. Zibtsev, S. V. (2000). Stan okhorony lisiv vid pozhezh v Ukraini ta holovni napriamky ii pokraschennia [The state of forest protection against fires in Ukraine and the main directions for its improvement]. *Naukovyj visnyk NAU*, 25, 319–329. [in Ukrainian].
6. Rusnak, I. S., Yemets', V. I. & Khyzhniak, V. V. (2014). Bezpilotna aviatsiia u sferi tsyvil'noho zakhystu Ukrainy. Stan i perspektyvy rozrobky ta zastosuvannia [Unmanned aircraft in the field of civil protection of Ukraine. Status and prospects for development and application]. *Nauka i oborona*, 2, 34–39. [in Ukrainian].
7. Ukrains'kyj naukovo-doslidnyj instytut tsyvil'noho zakhystu (2015). *Obgruntuvannia vymoh do perspektyvnykh ta modernizovanykh lital'nykh aparativ dlia aviatsijnoho zabezpechennia vykonannia zavdan' DSNS, vyznachennia ikh neobkhdnoho skladu, typazhu ta rozmischennia po rehionakh Ukrainy* [Justification of the requirements for promising and modernized aircraft for the aviation support of the tasks of the State Emergency Service, determination of their necessary composition, type and placement in the regions of Ukraine]. Kyiv: UkrNDITsZ [in Ukrainian].
8. Stein-Janney, T. (2012). *Aviatankery, istorychnyj ohliad* [Airtankers, an historic overview]. California Fire Pilots Ass. [in English].
9. Baskakova, A. O., Voronov, M. A. & Kramarenko, Yu. A. (2017). *Istoriya aviacionnoj ohrany lesov Rossii* [History of aviation protection of forests in Russia]. Pushkino: Avialesookhrana [in Russian].
10. Lytovchenko, A. O., Khyzhniak, V. V. & Yadchenko, D. M. (2021). Pidvyschennia spromozhnostej aviatsii DSNS Ukrainy za rakhunok terytorial'noho bazuvannia bezpilotnykh aviatsijnykh system vidpovidno do rehional'nykh otsinok pryrodno-tekhnogennoho navantazhennia [Increasing the aviation capabilities of the State Emergency Service of Ukraine due to the territorial basing of unmanned aircraft systems in accordance with regional assessments of the natural and man-made load], materialy 22 Vseukrains'koi naukovo-praktychnoi konferentsii (za mizhnarodnoiu uchastiu) [Proceedings of the 22nd All-Ukrainian Scientific and Practical Conference (with international participation)]. Kyiv [in Ukrainian].
11. Bondar, D. V., Humnyk, A. V., Lytovchenko, A. O., Khyzhniak, V. V., Shevchenko, V. L. & Yadchenko, D. M. (2022). *Zastosuvannia bezpilotnykh aviatsijnykh system u sferi tsyvil'noho zakhystu* [Application of unmanned aerial systems in the field of civil protection]. Kyiv: IDUNDITsZ [in Ukrainian].
12. Leschenko, H. A., Mandryk, Ya. S., Stratonov, V. M. & Davydov, S. A. (2021). Spособы zastosuvannia bezpilotnykh lital'nykh aparativ pid chas aviatsijnoho poshuku i riatushennia [Ways of using unmanned aerial vehicles during aviation search and rescue]. *Naukoiemni tekhnologii*, 3(51), 271–280. [in Ukrainian].
13. Abezgaуз, G. G., Tron, A. P., Kopenkin, Yu. N. & Korovina, I. A. (1970). *Spravochnik po veroyatnostnym raschetam* [Handbook of probabilistic calculations]. Moscow: Voenizdat [in Russian].
14. Rekordnyj polit ukrains'koho bezpilotnyka kompanii «Skaeton»: Aerokosmichnyj portal (2019). Retrieved from <https://space.com.ua/2019/07/01/rekordnij-polit-ukrayinskogo-bezpilotnika-kompaniyi-Skaeton> [in English].

SELECTION AND JUSTIFICATION OF CRITERIA FOR THE EFFECTIVENESS OF THE USE OF UNMANNED AERIAL SYSTEMS IN FIREFIGHTING OPERATIONS IN ECOLOGICAL SYSTEMS

V. Khizhnyak, V. Shevchenko

Institute of Public Administration and Research in Civil Protection, Ukraine

KEYWORDS ANNOTATION

unmanned
aerial system,
unmanned
aerial vehicle,
ecosystem
fires, aerial
search and
monitoring.

The global practice of fighting fires in ecological systems, focusing on the intensive development and expansion of the fields of application of unmanned aerial systems (UAS), is looking for ways to effectively implement their growing potential, as well as regulatory and organizational approaches to use in a single aviation system together with manned aircraft. Today, in the context of an emergency situation related to fires in ecosystems, UAS are able to carry out aerial reconnaissance, control and record current parameters, promptly transmit video footage of the burning cell and its development trends. In addition, the use of UAS makes it possible to determine the direction and speed of fire spread, the dynamics of changes in the configuration of the burning edge, to determine the shortest and safest routes for the deployment of emergency and rescue teams, as well as the distance to the nearest settlements that are threatened by the elements of a forest fire. Methodological approaches that are consistent with the generally accepted approaches in the general theory of the effectiveness of complex systems should be used to evaluate the effectiveness of UAS, which belong to complex technical means. The work substantiates the criteria and indicators that characterize the effectiveness of the use of various types of UAS in the performance of the tasks of the State Emergency Service of Ukraine in operations to eliminate fires in ecological systems. The proposed criteria and indicators of the effectiveness of the UAS application make it possible to form a set of effective alternative UAS options capable of solving the tasks defined for the aviation of the State Emergency Service of Ukraine for the elimination of fires in ecological systems, with the subsequent selection among them of the optimal combination of characteristics and the UAS option. Analysis and comparison of indicators of the effectiveness of the use of various UAS to solve the same type of tasks in the interests of the State Emergency Service of Ukraine makes it possible to significantly increase the efficiency of obtaining the necessary information for making timely management decisions by the relevant bodies in the process of planning and carrying out operations to eliminate fires in ecosystems.

УДК 614.843

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПОВЕДІНКИ ЛІТІЙ-ІОННИХ БАТАРЕЙ ПІД ДІЄЮ ВІДКРИТОГО ПОЛУМ'Я

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2.32-41>

Гаврилюк А. Ф., ORCID iD 0000-0002-8727-9950

Яковчук Р. С., ORCID iD 0000-0001-5523-5569

E-mail gavrilyk3@gmail.com

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 30.08.2023

Пройшла рецензування: 11.10.2023

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

пожежа електромобіля, літій-іонна батарея, пожежна безпека електромобіля, температура займання, тепловий потік, температура горіння.

АНОТАЦІЯ

Наведено динаміку збільшення парку електромобілів у різних країнах світу, а також прогнози щодо зазначеного на теренах Європейського Союзу. Визначено небезпеку їх використання, яка зумовлена виникненням незворотної екзотермічної реакції, що часто спричиняє займання і призводить не лише до пожеж, а й вибухів. Проаналізовано сучасний стан наукових досліджень щодо забезпечення пожежної безпеки та гасіння пожеж електромобілів, пожежної безпеки силових літій-іонних батарей, систем зберігання водню тощо. У роботі застосовувались експериментальний та теоретичний методи дослідження з використанням таких операцій, як синтез, аналіз, систематизація, узагальнення тощо. Сутність запропонованої методики експериментальних досліджень елементів силових батарей електромобілів щодо пожежної небезпеки відкритим полум'ям полягає у визначенні теплових параметрів (температури займання, горіння та теплового потоку), які описують процеси горіння силових літій-іонних акумуляторів електромобілів, а також у з'ясуванні впливу чинників на зазначені параметри. У цій методиці експериментальним шляхом обґрунтовано параметри модельного вогнища пожежі класу В, а також розміщення дослідних взірців силових акумуляторних батарей електромобілів і засобів вимірювальної техніки. Її застосування дасть змогу систематизувати та узагальнити пожежонебезпечні параметри елементів силових батарей електромобілів щодо пожежної небезпеки, а також дослідити вплив чинників на вказані параметри. Це сприятиме створенню підґрунтя до подальшого розвитку безпекових умов використання електромобілів, а також розроблення нових та ефективних засобів їх гасіння.

Постановка проблеми.

Збільшення кількості електромобілів як приватного, так і комерційного використання у загальному світовому парку автотранспорту є важливим кроком на шляху досягнення кліматичної нейтральності до 2050 р. За деякими прогнозами, до 2030 р. в ЄС буде налічуватись понад 30 млн електромобілів [1–2].

На рис. 1 наведено динаміку збільшення парку електромобілів за останні п'ять років у різних країнах світу. Їхню кількість станом на 2023 рік

спрогнозовано на основі продажу за перші два квартали поточного року [3].

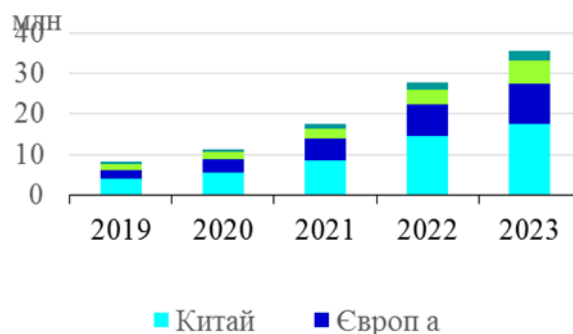


Рисунок 1 – Динаміка збільшення парку електромобілів у світі

Джерело: розробка авторів

Разом із тим у силових акумуляторних кислотних батареях (далі – АКБ) електромобілів за певних умов [4] може виникнути незворотна екзотермічна реакція, що часто спричиняє займання і призводить не лише до пожеж, а й вибухів електромобілів [5–9].

Значне занепокоєння у громадськості виникає через виділення горючих, вибухонебезпечних та токсичних газів [10], а також труднощі з огляду на особливості пожежі та необхідність великої кількості вогнегасних речовин [11], що відповідно зумовлює нові виклики для пожежно-рятувальних служб.

Зважаючи на це, проведення наукових розвідок щодо дослідження пожеж та інших пожежонебезпечних ситуацій, які можуть виникати в електромобілях, є надзвичайно важливим. Нові розроблені та досліджені безпекові підходи вплинуть на створення підґрунтя для зменшення матеріальних збитків та людських жертв унаслідок таких пожеж.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розв’язанням актуальних питань щодо забезпечення пожежної безпеки та гасіння пожеж електромобілів, пожежної безпеки силових літій-іонних батарей, систем зберігання водню опікувались такі вчені, як: Олена Функ, Кондрат Браун (Данія), Ола Вісланд, Йонна Гініенд, Фредрік Ларсон, Петра Андерссон, Роланд Бішоп (Швеція), Пітер Штурм, Даніель Фрувіт, Андрій Голубков (Австрія), Сонвук Кан (Корея), Ванг Цистон, Пінг Пінг, Чжан Цінзон, Цзянхао Ніу, Інбо Лю, Бінбін Мао (Китай), Юрій Ключка, Валентна Кривцова, Юрій Абрамов (Україна), Станіслав Столяров, Алекс Гарбер, Ян Пен, Ахмед Саїд (США), Дженіфер Вен, Чен Хаодун (Великобританія) та інші.

Так, у праці О. Функ з Датського інституту пожежної техніки та технологій безпеки зазначено про проведення повномасштабних вогневих випробувань електромобілів на закритому паркінгу. За результатами експериментів, температура продуктів горіння на висоті стелі становила понад 1000 °С, що створює

ризик для сталених конструкцій. А перекидання полум’я на поруч припарковані автомобілі становило від 3 хв до 45 хв від початку вогневих випробувань і залежало від місця розміщення джерела займання [12].

О. Вісланд та її колеги з Дослідницького інституту Швеції (RESE) вивчали потужність теплового випромінювання, яка генерується пожежами електромобілів, а також токсичність продуктів згоряння. Дослідники встановили, що кількість продуктів згоряння внаслідок пожеж електромобілів є значно більшою, ніж від пожеж аналогічних автомобілів, які обладнані двигуном внутрішнього згоряння (далі – ДВЗ) [13].

П. Штурм із Технологічного університету Граца встановив, що внаслідок пожежі електромобіля із силовою АКБ ємністю 80 кВт/год за 100% заряду батареї потужність теплового потоку складає понад 10 МВт, що удвічі більше, ніж для аналогічного автомобіля із ДВЗ [14].

Науковці Йонна Гініен та інші [15] з Науково-дослідного інституту Швеції на підставі повномасштабних випробувань з’ясували, що для електромобілів, обладнаних силовою АКБ ємністю 50 кВт/год зі станом заряду 90%, 40 кВт/год зі станом заряду 80% та 24 кВт/год зі станом заряду також 80%, сумарна енергія тепловиділення складає 5,7 ГДж, 5,2 ГДж та 6,7 ГДж відповідно.

Сонвук Кан із Корейського центру пожежних випробувань та досліджень розглянув питому теплоту згоряння речовин та матеріалів, які використовуються для виготовлення електромобілів. Встановлено, що матеріали нових електромобілів мають вищу теплоту згоряння, ніж ті, що були виготовлені 5–7 років тому [16].

Пінг із Університету науки і технологій встановив, що внутрішнє коротке замикання силових батарей електромобілів є основною причиною, яка призводить до займань електромобілів [17].

А. Голубков із Технологічного університету Граца вивчав процеси виникнення незворотної екзотермічної реакції у корпусі силової батареї електромобілів. Встановлено, що температура у момент виникнення незворотної екзотермічної реакції за декілька секунд збільшується від 220 °C до 700–750 °C [18].

Також було досліджено вплив старіння батарей електромобілів на їх пожежну безпеку. З'ясовано, що з процесом старіння, зменшенням ємності АКБ потужність перебігу незворотної екзотермічної реакції зменшується, а отже, зменшується рівень пожежної небезпеки таких батарей. Винятком може слугувати випадок утворення свіжого літію внаслідок експлуатації електромобіля, що потребує детального вивчення [19–20].

Цінсон Чан з Університету цивільної авіації Китаю встановив залежність між ступенем заряду батареї та процесом її горіння. У разі збільшення заряду батарея демонструє нижчу термічну стабільність (тобто є більш пожежонебезпечною). А батареї, що на 100% заряджені, здатні створювати найбільший тиск вибуху [21].

Інбо Лю з Науково-технологічного парку Китаю розглянув питання пожежної небезпеки силових батарей у разі їх надмірного заряджання. Досліджено температурні параметри, які виникають у разі надмірного заряджання силових батарей, а також їх здатність до займання [22].

Бабін Моа з Університету науки і технологій Китаю дослідив висоту полум'я пожежі для батарей типу 18650, яка може скласти до 0,4 м під час горіння лише одного елемента [23].

У науковій праці [24] надано оцінку пожежній безпеці різних типів силових АКБ, які використовуються в електромобілях.

Автори роботи [25] провели моделювання пожежі електромобіля, що перебуває на закритому паркінгу. З огляду на зазначене встановлено, що мінімальна протипожежна відстань впродовж часу вільного розвитку 610 с для пожежі

електромобіля на закритому паркінгу по флангу становить 10 м, а по фронту – 6 м. Ураховуючи, що паркування авто може бути як поздовжнім, так і поперечним, доцільно взяти найбільше значення протипожежної відстані, тобто 10 м.

Ю. Ключка [26] досліджував основи забезпечення пожежовибухобезпечності систем зберігання водню на автотранспортних засобах, зокрема й на електромобілях. Ю. Абрамов [27] обґрунтував характеристики контролю пожежонебезпечного стану системи зберігання та подавання водню на електромобілях.

С. Столяров із Інженерної школи А. Джеймса Кларка США досліджував загальну концепцію безпеки літій-іонних батарей [28].

Науковець Ахмед Саїд із Університету Міреленда США досліджував гасіння пожежі літій-іонних батарей типу 18650 за допомогою дрібнорозпиленої води [29].

Однак у згаданих вище роботах не досліджено питання стосовно розроблення концептуальної методики, яка б дала змогу дослідити основні пожежонебезпечні параметри літій-іонних батарей.

Формулювання цілей дослідження. Мета роботи полягає у розробленні основних положень методики експериментальних досліджень літій-іонних батарей щодо пожежної небезпеки відкритим полум'ям.

Кінцева мета дослідження полягає у визначенні теплових параметрів (температури займання, горіння та густини теплового потоку), які описують процеси горіння силових літій-іонних акумуляторів електромобілів, дослідженні впливу чинників на ці параметри та виявленні закономірностей, а також розкритті особливостей перебігу таких процесів (горіння).

Для цього необхідно розв'язати такі задачі:

- визначити необхідне обладнання та засоби вимірювальної техніки (далі – ЗВТ);

- обґрунтувати модельне вогнище пожежі, розміщення ЗВТ та дослідних взірців;

- обґрунтувати порядок проведення натурних вогневих випробувань із забезпеченням умов безпеки праці, а також порядок проведення обробки отриманих результатів досліджень.

Методи дослідження. У роботі для досягнення задекларованої мети використаний експериментальний та теоретичний методи дослідження. У теоретичному методі досліджень, були застосовані такі операції, як: синтез, аналіз, систематизація, узагальнення тощо.

Виклад основного матеріалу. Сутність розробленої методики полягає у визначенні теплових параметрів (температури займання, горіння та густини теплового потоку), які описують процеси горіння силових літій-іонних акумуляторів електромобілів, а також дослідженні впливу чинників на вказані параметри. Обладнання для проведення натурних вогневих досліджень включає: модельне вогнище пожежі класу В, досліджувані зразки, засоби вимірювальної техніки, обладнання для проведення фото- та відеознімання.

Для наукової розвідки вибрані модельні вогнища класів В, перевагою яких щодо модельних вогнищ класу А є те, що вони дають кращу повторюваність теплових характеристик. Це зумовлюється незмінними параметрами пального. Натомість деревина може бути різних хвойних порід (сосна, ялина, ялівець тощо). Ба більше, бруски можуть виготовлятися також із різного сорту деревини, що і впливає на температурні параметри. Отже, з огляду на це для ініціювання займання вибрано модельне вогнище класу В.

Модельне вогнище створюється бензином марки А-92 та об'ємом 200 мл,

який розміщується у металевому деку діаметром 140 ± 5 мм, висотою борта 100 ± 5 мм та товщиною стінки борта $2,0 \pm 0,5$ мм. Розміри дека та кількість пального обґрунтовано експериментальним шляхом з міркувань забезпечення часу горіння модельного вогнища 6–7 хв, а також охоплення дослідних взірців полум'ям.

Перед проведенням експерименту необхідно провести зважування кожного елемента за допомогою електронних ваг із точністю зважування не менше 0,5 г.

Стан заряду батарей необхідно здійснювати за допомогою мультиметра (рис. 2а) з точністю не менше 0,1 В. У разі необхідності для збільшення заряду можна використовувати зарядний пристрій, який сумісний із параметрами досліджуваних взірців батарей електромобілів.

Розподіл температурного поля, а також температуру зовні осередка горіння доцільно фіксувати за допомогою телевізійної камери LEADER TIC 3 (або аналог), з діапазоном вимірювання температур -40 °С до 1150 °С.

З метою обґрунтування місця розміщення випробувальних зразків проведено експериментальні дослідження із визначення розподілу температур щодо джерела нагрівання.

Для цього у деку поміщено 200 мл пального, і над деком розміщено 4 термопари, перша із них – у центрі дека по горизонталі із верхнім краєм стінки дека. Кожна наступна термопара розміщувалась на 7 см ($L1=7$ см) вище першої, як це наведено на рис. 2.

Пристрій для визначення густини теплового потоку ВТП-01 розміщувався на відстані 30 см ($L3$) по вертикалі та 20 см від центра ($L2$) дека по горизонталі (рис. 2).

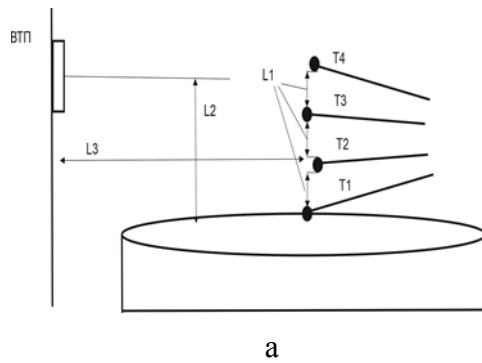


Рисунок 2 – Схематичне (а) та натурне (б) зображення розміщення термопар щодо дека

Джерело: розробка авторів

На рис. 3 показано проведення експерименту із визначення температурного розподілу від модельного вогнища пожежі класу В.



Рисунок 3 – Фото під час проведення експерименту

Джерело: розробка авторів

Результати досліджень наведені на рис. 4. Час повного вигорання пального становив 11 хв 20 с, а інтенсивного горіння – 7 хв 10 с. Найбільша температура досягалась на 3–4 хв від початку випробувань. Найбільше значення температури фіксувала термопара T2, яка розміщувалась на висоті 7 см від борта дека, пікові значення якої становили близько 1000 °С, а усереднені – 600–650 °С. Значення термопари T3, яка розміщувалась на висоті 14 см, незначно відрізнялось від значення термопари T2, і усереднене значення коливалось в межах 580–650 °С, а максимальна – 950 °С. Термопара T1 розміщувалась на одній горизонталі із краєм дека і фіксувала максимальну температуру до 550 °С, а усереднена була в межах 400–420 °С.

Таким чином, встановлено: для модельного вогнища класу В, яке утворене горінням 200 мл бензину марки А-92, що поміщене в кругле деко діаметром 140 мм, максимальна температура горіння досягається на відріжку 7–14 см по вертикалі від краю дека і складає 950–1000 °С, а усереднена – 600–650 °С.

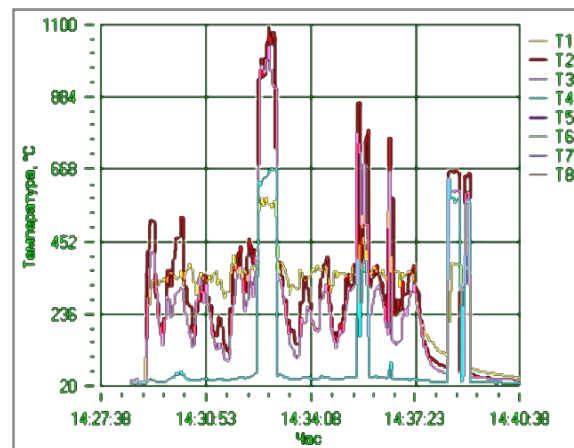


Рисунок 4 – Результати досліджень щодо обґрунтування місця улаштування досліджуваних зразків щодо джерела нагрівання

Джерело: розробка авторів

Отже, обґрунтовано розміщення дослідних зразків у модельному вогнищі пожежі класу В, яке утворене горінням 200 мл бензину марки А-92, у деку діаметром 140 мм на висоті 7–14 см по вертикалі від верхнього краю дека.

На випробувальні зразки елементів літій-іонних батарей кріпились дві термопари, як зображено на рис. 5.

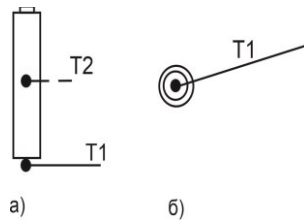


Рисунок 5 – Схема улаштування термопар на випробувальних зразках: а) вигляд збоку; б) вигляд знизу

Джерело: розробка авторів

Термопара Т1 фіксує температуру дії модельного полум'я на силові АКБ,

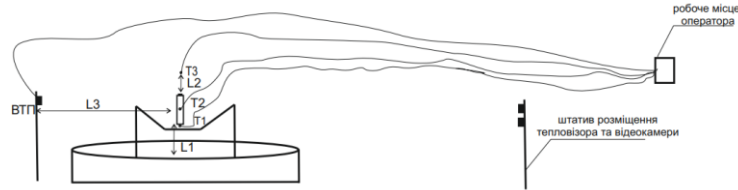


Рисунок 6 – Схема улаштування випробувальних зразків та засобів вимірювальної техніки

Джерело: розробка авторів

Випробування елементів літій-іонних батарей здійснюється у трьох положеннях: вертикальному анодом вниз, вертикальному анодом вгору, горизонтальному.

З метою дослідження впливу стану заряду АКБ на теплові характеристики формується три групи дослідних взірців: зі 100% станом заряду, із 50% та повністю розряджені. За потреби інтервал стану заряду можна зменшити. Для кожного стану заряду АКБ та її розміщення проводиться не менше трьох експериментів.

Тепловізор фіксує зміну розміру полум'я та термографічне зображення

а також температуру нагрівання батарей на межі полум'я – батарея. Термопара Т2 кріпиться посередині батареї та фіксує температуру нагрівання батарей.

Термопара Т3 (рис. 6) розміщується на відстані L_2 ($L_2=7$ см) від верхнього краю силових АКБ і фіксує температуру полум'я, яке утворено модельним вогнищем пожежі та полум'ям, яке може утворитись внаслідок горіння силових АКБ.

розвитку горіння. Відеокамера фіксуватиме динаміку розвитку полум'я у часі. Розміщується телевизор і відеокамера на штативі із врахуванням вимог їх безпечної роботи.

Приймач теплового потоку розміщується за допомогою штатива на одній горизонталі з досліджуваними зразками літій-іонних батарей.

Перелік засобів вимірювальної техніки, які використовуються під час натурних вогневих досліджень, а також їх технічні характеристики наведені в таблиці.

Таблиця 1 Технічні характеристики обладнання, призначеного для досліджень

№ з/п	Найменування обладнання, призначеного для досліджень	Характеристика	Значення характеристики	Одиниці вимірювання	Похибка
1	Пристрій для вимірювання теплового потоку	Густина теплового потоку			
2	Приймач теплового потоку ВТП-01	Густина теплового потоку	0÷630	кВт/м ²	±5%
3	Термопари ТХА	Температура	-40÷1350	°С	±2,5 %
4	Регулятор-вимірювач РТ 0102-8-К	Температура	-40÷1350	°С	±2,5 %
5	Фото-, відеокамера	Матриця	14,2	пікселей	
6	Тепловізор	Матриця	320 x 240	пікселей	
7	Ваги ТВЕ 150	Маса	0.04 ÷ 120.0кг	кг	

Джерело: розробка авторів

Послідовність проведення досліджень:

- підготовка ЗВТ та обладнання, пристроїв фото- та відеофіксації (табл.1).
- здійснення вимірювання показників температури і вологості повітря, швидкості вітру, абсолютного атмосферного тиску;
- здійснення вмикання та вимірювань значень температур усіх влаштованих термопар і теплового випромінювання пристроєм ВТП-01 без дії полум'я та перевірка їх роботи ;
- заповнення дека бензином А-92 за 2 хв до початку випробувань;
- вмикання вимірювально-обчислювальних пристроїв у режим реєстрації, здійснюється відеознімання та підпалюється модельне вогнище пожежі класу В.

Під час проведення експериментальних досліджень здійснюється вимірювання та реєстрація температур поверхні дослідного зразка, полум'я та потужність теплового потоку від модельного вогнища пожежі.

Реєстрація температури і теплового потоку здійснюється з інтервалом не більше ніж 2 с. Фото- та відеознімання проводиться на всьому етапі експериментальних досліджень з метою визначення геометричних параметрів полум'я.

Дослідження тривають до повного вигорання пального у вогнищі пожежі класу В.

На підставі результатів досліджень для кожного моменту часу t_j вимірювання визначають температуру T_j поверхні дослідного зразка, щільність теплового потоку (q_j), геометричні параметри полум'я (h_j , δ_j). Експериментальні дані заносяться до журналу.

За отриманими даними визначається похибка досліджень за формулою [31]:

$$\Delta A = \pm \sqrt{(\Delta A_1)^2 + (\Delta A_2)^2} \quad (1)$$

де ΔA – абсолютна похибка досліджуваних величин;

ΔA_1 – похибка датчиків (термопар, датчика теплового потоку, інструментальна);

ΔA_2 – похибка вимірювальних пристроїв (вимірювально-обчислювальна система

«Термоконт», пристрій для вимірювання теплового потоку, похибка зняття результатів для вимірювання розмірів (зазвичай дорівнює половині ціни поділки засобів вимірювань));
 k – коефіцієнт, який залежить від імовірності ($k=1,1$ при $P=0,95$).

Фіксуються середні значення температур та густини теплового потоку, а також геометричні параметри полум'я. Результати відображаються у графічній формі як залежності.

Під час проведення досліджень слід керуватись вимогами та інструкціями з охорони праці та іншими документами, які зумовлюють безпечне проведення експериментальних досліджень.

Перед проведенням досліджень усі особи, які задіяні, повинні пройти інструктаж з охорони праці та ознайомитись з порядком проведення досліджень. Також необхідно визначити та обгородити небезпечну зону проведення експериментальних досліджень, відстань має складати не менше 10 м від вогнища пожежі. Місце проведення експерименту повинне забезпечуватись первинними засобами пожежогасіння. З метою забезпечення безпеки оператор має бути одягнений в захисний одяг пожежника загального призначення. Забороняється подавати воду в осередок вогнища пожежі.

Висновки та напрями подальших досліджень. Запропонована методика експериментальних досліджень поведінки літій-іонних батарей під дією відкритого полум'я дасть змогу визначити теплові параметри (температури займання, горіння та теплового потоку), які описують процеси горіння силових літій-іонних акумуляторів електромобілів, а також дослідити вплив чинників на вказані параметри. У методиці експериментальним шляхом обґрунтовано параметри модельного вогнища пожежі класу В, а також розміщення ЗВТ.

Надалі дослідження спрямовуватимуться на проведення експериментів згідно з цією методикою та здійснення оцінювання отриманих результатів, що й увійде у наступну публікацію.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Gkoumas K., Marques dos Santos, F. L., Stepniak, M., & Pekár F. (2021). Research and Innovation Supporting the European Sustainable and Smart Mobility Strategy : A Technology Perspective from Recent European Union Projects. *Applied Sciences*, 11(24), 11981.
2. Fetting C. (2020). The European green deal. ESDN report, 53.
3. Global EV Data Explorer. Paris, France : IEA. (2021).
4. Hammami A., Raymond N., Armand M. Lithium-ion batteries: runaway risk of forming toxic compounds. *Nature*. 2003 Aug 7;424(6949):635-6. Doi : 10.1038/424635b. PMID: 12904779
5. Schmidt A., Oehler D., Weber A., Wetzel T., & Ivers-Tiffée E. (2021). A multi scale multi domain model for large format lithium-ion batteries. *Electrochimica Acta*, 393, 139046.
6. Chen M., Sun Q., Li Y., Wu K., Liu B., Peng P., & Wang Q. (2015). A thermal runaway simulation on a lithium titanate battery and the battery module. *Energies*. 8(1). P. 490–500.
7. Wu W., Xiao X., & Huang X. (2012). The effect of battery design parameters on heat generation and utilization in a Li-ion cell. *Electrochimica Acta*, 83. P. 227–240.
8. Abada S., Marlair, G. Lecocq, A. Petit, M., Sauvart-Moynot V., & Huet F. (2016). Safety focused modeling of lithium-ion batteries: A review. *Journal of Power Sources*, 306. P. 178–192.
9. Anderson J., Larsson, F. Andersson, P. & Mellander B. E. Thermal modeling of fire propagation in lithium-ion batteries. In *Proceedings of The 24th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*, Gothenburg, Sweden. P. 8–11.
10. Larsson F., Andersson, P. & Mellander B. E. Lithium-ion battery aspects on fires in electrified vehicles on the basis of experimental abuse tests. *Batteries*, 2(2). 2016. P. 9.
11. Peng Y., Yang, L., Ju X., Liao B., Ye K., Li L., ... & Ni Y. (2020). A comprehensive investigation on the thermal and toxic hazards of large format lithium-ion batteries with LiFePO₄ cathode. *Journal of hazardous materials*, 381, 120916.
12. Funk E., Flecknoe-Brown K. W., Wijesekere T., Husted B. P., & Andres B. (2023). Fire extinguishment tests of electric vehicles in an open sided enclosure. *Fire Safety Journal*, 103920.
13. Willstrand, O., Bisschop, R., Blomqvist, P., Temple, A., & Anderson, J. (2020). Toxic gases from fire in electric vehicles.
14. Sturm P., Föbtleitner P., Fruhwirt D., Galler R., Wenighofer R., Heindl S. F., ... & Heger, O. (2022). Fire tests with lithium-ion battery electric vehicles in road tunnels. *Fire safety journal*, 134, 103695.
15. Hynynen J., Willstrand O., Blomqvist P., & Andersson, P. (2023). Analysis of combustion gases from large-scale electric vehicle fire tests. *Fire Safety Journal*, 139, 103829.
16. Kang S., Kwon M., Choi J. Y., & Choi S. (2023). Full-scale fire testing of battery electric vehicles. *Applied Energy*, 332, 120497
17. Ping P., Wang Q., Huang P., Li K., Sun J., Kong D., & Chen C. (2015). Study of the fire behavior of high-energy lithium-ion batteries with full-scale burning test. *Journal of Power Sources*, 285. P. 80–89.
18. Golubkov A. W., Fuchs D., Wagner J., Wiltsche H., Stangl C., Fauler G., ... & Hacker V. (2014). Thermal-runaway experiments on consumer Li-ion batteries with metal-oxide and olivin-type cathodes. *Rsc Advances*, 4(7), 3633-3642
19. Essl C., Golubkov, A. W., & Fuchs A. (2021). Influence of aging on the failing behavior of automotive lithium-ion batteries. *Batteries*, 7(2), 23.
20. Ren D., Hsu H., Li R., Feng X., Guo D., Han X., ... & Ouyang M. A comparative investigation of aging effects on thermal runaway behavior of lithium-ion batteries. *ETransportation*, 2. 2019. 100034.
21. Zhang, Q., Niu, J., Zhao, Z., & Wang, Q. Research on the effect of thermal runaway gas components and explosion limits of lithium-ion batteries under different charge states. *Journal of Energy Storage*, . (2022). 45, 103759
22. Liu Y., Huo R., Qin H., Li X., Wei D., & Zeng T. Overcharge investigation of degradations and behaviors of large format lithium ion battery with Li (Ni_{0.6}Co_{0.2}Mn_{0.2}) O₂ cathode. *Journal of Energy Storage*, 31, 101643.
23. Mao, B., Zhao, C., Chen, H., Wang, Q., & Sun, J. (2021). Experimental and modeling analysis of jet flow and fire dynamics of 18650-type lithium-ion battery. *Applied Energy*, 281, 116054.
24. Гаврилюк А. Ф., Кушнір А. П. Аналіз пожежної небезпеки електромобілів за термічною стабільністю силової літійової акумуляторної батареї. *Пожежна безпека*. 2022. С. 31–39. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.40.2022.04>.
25. Gavryliuk, A., Yakovchuk, R., Chalyy, D., Lemishko, M., & Tur, N. Determination of fire protection distances during a tesla model s fire in a closed parking lot. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(10 (122)). P. 39–46. URL : <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.277999> (дата звернення : 12.10.2023).
26. Ключка, Ю. П., & Кривцова, В. І. Визначення характеристик витікання водню з криогенної системи зберігання.
27. Абрамов Ю. А. Обґрунтування характеристик системи контролю пожежонебезпечного стану системи зберігання та подачі водню / Ю. О. Абрамов, В. І. Кривцова, А. О. Михайлюк. *Комунальне господарство міст*. Харків, 2023. Т. 1. Вип. 175. С. 125–130. DOI : 10.33042/2522-1809-2023-1-175-125-130.
28. Wang Q., Wen J., & Stolarov S. (2020). Special issue on lithium battery fire safety. *Fire Technology*, 56, 2345–2347.
29. Said, A. O., Garber, A., Peng, Y., & Stolarov, S. I. (2022). Experimental investigation of suppression of 18650 lithium ion cell array fires with water mist. *Fire technology*, 1-29.
30. Rappsilbe T., Yusfi N., Krüger S., Hahn S. K., Fellinger T. P., von Nidda J. K., & Tschirschwitz R. Meta-analysis of heat release and smoke gas emission during thermal runaway of lithium-ion batteries. *Journal of Energy Storage*. № 60. 2023. 106579.
31. Ніжний В. В. Розвиток наукових основ оцінювання небезпеки поширення пожежі на суміжні будівельні об'єкти : дис. ... д-ра. техн. наук : 261. Київ, 2020. 409 с

REFERENCES

1. Gkoumas, K., Marques dos Santos, F. L., Stepniak, M., & Pekár, F. (2021). Research and Innovation Supporting the European Sustainable and Smart Mobility Strategy: A Technology Perspective from Recent European Union Projects. *Applied Sciences*, 11(24), 11981. [in English].
2. Fetting, C. (2020). The European green deal. ESDN report, 53[in English].
3. Global EV Data Explorer. Paris, France: IEA. (2021). [in English].
4. Hammami, A., Raymond, N., Armand M. Lithium-ion batteries: runaway risk of forming toxic compounds. *Nature*. 2003 Aug 7;424(6949):635-6. doi: 10.1038/424635b. PMID: 12904779 [in English].

5. Schmidt, A., Oehler, D., Weber, A., Wetzel, T., & Ivers-Tiffée, E. (2021). A multi scale multi domain model for large format lithium-ion batteries. *Electrochimica Acta*, 393, 139046 [in English].
6. Chen, M., Sun, Q., Li, Y., Wu, K., Liu, B., Peng, P., & Wang, Q. (2015). A thermal runaway simulation on a lithium titanate battery and the battery module. *Energies*, 8(1), 490-500 [in English].
7. Wu, W., Xiao, X., & Huang, X. (2012). The effect of battery design parameters on heat generation and utilization in a Li-ion cell. *Electrochimica Acta*, 83, 227-240 [in English].
8. Abada, S., Marlair, G., Lecocq, A., Petit, M., Sauvart-Moynot, V., & Huet, F. (2016). Safety focused modeling of lithium-ion batteries: A review. *Journal of Power Sources*, 306, 178-192 [in English].
9. Anderson, J., Larsson, F., Andersson, P., & Mellander, B. E. (2015, June). Thermal modeling of fire propagation in lithium-ion batteries. In *Proceedings of The 24th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*, Gothenburg, Sweden (pp. 8-11) [in English].
10. Larsson, F., Andersson, P., & Mellander, B. E. (2016). Lithium-ion battery aspects on fires in electrified vehicles on the basis of experimental abuse tests. *Batteries*, 2(2), 9 [in English].
11. Peng, Y., Yang, L., Ju, X., Liao, B., Ye, K., Li, L., ... & Ni, Y. (2020). A comprehensive investigation on the thermal and toxic hazards of large format lithium-ion batteries with LiFePO₄ cathode. *Journal of hazardous materials*, 381, 120916. [in English].
12. Funk, E., Flecknoe-Brown, K. W., Wijesekere, T., Husted, B. P., & Andres, B. (2023). Fire extinguishment tests of electric vehicles in an open sided enclosure. *Fire Safety Journal*, 103920 [in English].
13. Willstrand, O., Bisschop, R., Blomqvist, P., Temple, A., & Anderson, J. (2020). Toxic gases from fire in electric vehicles [in English].
14. Sturm, P., Föbleitner, P., Fruhwirt, D., Galler, R., Wenighofer, R., Heindl, S. F., ... & Heger, O. (2022). Fire tests with lithium-ion battery electric vehicles in road tunnels. *Fire safety journal*, 134, 103695 [in English].
15. Hynynen, J., Willstrand, O., Blomqvist, P., & Andersson, P. (2023). Analysis of combustion gases from large-scale electric vehicle fire tests. *Fire Safety Journal*, 139, 103829 [in English].
16. Kang, S., Kwon, M., Choi, J. Y., & Choi, S. (2023). Full-scale fire testing of battery electric vehicles. *Applied Energy*, 332, 120497 [in English].
17. Ping, P., Wang, Q., Huang, P., Li, K., Sun, J., Kong, D., & Chen, C. (2015). Study of the fire behavior of high-energy lithium-ion batteries with full-scale burning test. *Journal of Power Sources*, 285, 80-89 [in English].
18. Golubkov, A. W., Fuchs, D., Wagner, J., Wiltische, H., Stangl, C., Fauler, G., ... & Hacker, V. (2014). Thermal-runaway experiments on consumer Li-ion batteries with metal-oxide and olivin-type cathodes. *Rsc Advances*, 4(7), 3633-3642 [in English].
19. Essl, C., Golubkov, A. W., & Fuchs, A. (2021). Influence of aging on the failing behavior of automotive lithium-ion batteries. *Batteries*, 7(2), 23 [in English].
20. Ren, D., Hsu, H., Li, R., Feng, X., Guo, D., Han, X., ... & Ouyang, M. (2019). A comparative investigation of aging effects on thermal runaway behavior of lithium-ion batteries. *ETransportation*, 2, 100034 [in English].
21. Zhang, Q., Niu, J., Zhao, Z., & Wang, Q. (2022). Research on the effect of thermal runaway gas components and explosion limits of lithium-ion batteries under different charge states. *Journal of Energy Storage*, 45, 103759 [in English].
22. Liu, Y., Huo, R., Qin, H., Li, X., Wei, D., & Zeng, T. (2020). Overcharge investigation of degradations and behaviors of large format lithium ion battery with Li (Ni_{0.6}Co_{0.2}Mn_{0.2}) O₂ cathode. *Journal of Energy Storage*, 31, 101643 [in English].
23. Mao, B., Zhao, C., Chen, H., Wang, Q., & Sun, J. (2021). Experimental and modeling analysis of jet flow and fire dynamics of 18650-type lithium-ion battery. *Applied Energy*, 281, 116054 [in English].
24. Gavryliuk A. F., Kushnir A.P. (2022). Analiz pozhеzhnoi nebezpeky elektromobiliv za termichnoi stabilnistii sylovoi litiievoi akumulatornoї batarei. *Pozhezhna bezpeka*, 40, 31-39. <https://doi.org/10.32447/20786662.40.2022.04> [in English].
25. Gavryliuk, A., Yakovchuk, R., Chalyy, D., Lemishko, M., & Tur, N. (2023). Determination of fire protection distances during a tesla model s fire in a closed parking lot. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(10) (122), 39-46. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.277999> [in English].
26. Kliuchka, Yu. P., & Kryvtsova, V. I. (2012). Vyznachennia kharakterystyk vytikannia vodniu z kriohennoi systemy zberihannia. [in English].
27. Abramov Yu.A. Obgruntuvannia kharakterystyk systemy kontroliu pozhеzhonebezpechnoho stanu systemy zberihannia ta podachi vodniu / Yu.O. Abramov, V.I. Kryvtsova, A.O. Mykhailiuk// *Komunalne hospodarstvo mist. Kharkyv*, 2023. Tom 1, Vyp. 175.- S.125-130. DOI: 10.33042/2522-1809-2023-1-175-125-130 [in English].
28. Wang, Q., Wen, J., & Stolarov, S. (2020). Special issue on lithium battery fire safety. *Fire Technology*, 56, 2345-2347 [in English].
29. Said, A. O., Garber, A., Peng, Y., & Stolarov, S. I. (2022). Experimental investigation of suppression of 18650 lithium ion cell array fires with water mist. *Fire technology*, 1-29 [in English].
30. Rappsilber, T., Yusfi, N., Krüger, S., Hahn, S. K., Fellingner, T. P., von Nidda, J. K., & Tschirschwitz, R. (2023). Meta-analysis of heat release and smoke gas emission during thermal runaway of lithium-ion batteries. *Journal of Energy Storage*, 60, 106579 [in English].
31. Nizhnyk, V. V. (2020) *Rozvytok naukovykh osnov otsiniuvannia nebezpeky poshyrennia pozhеzhi na sumizhni budivelni obiekty* [Development of scientific bases for assessing the danger of fire spreading to adjacent construction objects]. (Doctor's thesis). Kyiv [in Ukrainian].

METHODS OF EXPERIMENTAL RESEARCH BEHAVIOR OF LITHIUM-ION BATTERIES UNDER THE INFLUENCE OF OPEN FLAME

A. Gavryliuk, R. Yakovchuk

Lviv State University of Life Safety, Ukraine

KEYWORDS

electric vehicle
fire, lithium-ion
battery, fire
hazard of an
electric vehicle,
ignition
temperature,
heat flux,
combustion
temperature.

ANNOTATION

The article presents the dynamics of the number of electric vehicles in different countries of the world, as well as forecasts of their development in the European Union. the hazards of using electric vehicles are identified, which are caused by the occurrence of an irreversible exothermic reaction, which often causes ignition and leads not only to fires but also to explosions of electric vehicles. The current state of scientific research in the field of topical issues related to fire safety and fire extinguishing of electric vehicles, fire safety of power lithium-ion batteries, hydrogen storage systems, etc. is analysed. the work uses experimental and theoretical research methods, using the following operations: synthesis, analysis, systematisation, generalisation, etc. The essence of the proposed methodology for experimental studies of electric vehicle power battery elements for open flame fire hazard is to determine the thermal parameters (ignition temperature, combustion temperature and heat flux) that describe the combustion processes of electric vehicle power lithium-ion batteries, as well as to study the influence of factors on these parameters. the proposed methodology experimentally substantiates the parameters of a model fire of class c, as well as the placement of prototypes of power batteries and their placement in the open flame. The application of the proposed methodology will allow to systematise and generalise the fire-hazardous parameters of the elements of electric vehicle power batteries for fire hazard, as well as to study the influence of factors on these parameters. this will create the basis for further development of safe conditions for the use of electric vehicles, as well as the development of new and effective means of extinguishing them.

УДК 614.841:536.46

ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНИХ ЗНАЧЕНЬ ПАРАМЕТРІВ ЗОВНІШНІХ ТЕРМІЧНИХ ВПЛИВІВ НА ПІРОТЕХНІЧНІ ВИРОБИ НА ОСНОВІ НІТРАТНО-МЕТАЛЕВИХ СУМІШЕЙ В УМОВАХ ЇХ ЗБЕРІГАННЯ ТА ТРАНСПОРТУВАННЯ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2.42-57>

Козяр Н. М., ORCID iD 0000-0001-9082-0771

Кириченко О. В., ORCID iD 0000-0002-0240-1807

Ковбаса В. О., ORCID iD 0 0000-0002-9479-669X

Дядюшенко О. О.*, ORCID iD 0000-0003-0797-2251

Ващенко В. А., ORCID iD 0000-0003-0722-9353

Колінько С. О., ORCID iD 0000-0002-0234-8655

*E-mail: oleksandr_diadiushenko@chipb.org.in

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

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 27.09.2023

Пройшла рецензування: 16.10.2023

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

пожежна безпека, піротехнічні вироби, піротехнічні суміші, зовнішні термічні дії, теплові процеси.

АНОТАЦІЯ

Проаналізовано властивості піротехнічних виробів різного призначення (сигнальні та трасувальні засоби, піротехнічні спалахувачі, елементи ракетно-космічної техніки тощо) на основі багатокомпонентних ущільнених сумішей з порошків металевих палих (магнію, алюмінію, алюмінієво-магнієвих сплавів (ПМ) та інших), нітратовмісних окиснювачів (нітратів лужних та лужноземельних металів тощо) і добавок різних органічних (парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену, уротропіну, ідиолу тощо) та неорганічних речовин (фторидів металів тощо). Встановлено, що під час зберігання та транспортування вони можуть піддаватись інтенсивним зовнішнім термічним впливам (наприклад у разі пожеж у складських приміщеннях, де зберігаються вироби, загоряння близько розташованих легкозаймистих об'єктів, у зонах бойових дій тощо), внаслідок чого відбувається передчасне займання зарядів сумішей, що призводить до руйнування виробів з утворенням високотемпературних продуктів згоряння (до 3000...4000 К), які розлітаються у різні боки та мають пожежну небезпеку для навколишніх об'єктів (паливно-мастильних матеріалів, дерев'яних будівель, пускових установок з обслуговуючим персоналом тощо). Розроблено математичні моделі зовнішніх термічних впливів на поверхню зарядів нітратно-металізованих сумішей з добавками органічних та неорганічних речовин для піротехнічних виробів різного призначення в умовах зберігання або транспортування, які враховують геометричну форму зарядів (плоскі пластини, циліндричні стрижні та напівсферичні елементи); термомеханічні властивості та технологічні параметри суміші; температурні залежності теплофізичних властивостей сумішей. Проведено розрахунки розподілів температури у зарядах сумішей та визначено критичні значення зовнішнього теплового потоку та часу його дії, перевищення яких призводить до передчасного займання зарядів сумішей, вибухового розвитку їх горіння та насамкінець до пожежонебезпечного руйнування піротехнічних виробів і навколишніх об'єктів.

Потановка

Піротехнічні вироби різного призначення (сигнальні та трасувальні засоби,

проблеми.

піротехнічні спалахувачі, елементи ракетно-космічної техніки тощо) на основі багатокомпонентних ущільнених сумішей з порошків металевих палих (магнію,

алюмінію, алюмінієво-магнієвих сплавів (ПАМ) та інших), нітратовмісних окиснювачів (нітратів лужних та лужноземельних металів тощо) і добавок різних органічних (парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену, уротропіну, ідитолу та інших) та неорганічних речовин (фторидів металів тощо) у разі зберігання та транспортування можуть піддаватись інтенсивним зовнішнім термічним впливам (наприклад, під час пожеж у складських приміщеннях, де зберігаються вироби, загоряння близько розташованих легкозаймистих об'єктів, у зонах бойових дій тощо) [1–6].

Унаслідок зазначеного відбувається передчасне займання зарядів сумішей, що призводить до руйнування виробів з утворенням високотемпературних продуктів згоряння (до 3000...4000 K), які розлітаються у різні боки та мають пожежну небезпеку для навколишніх об'єктів (паливно-мастильних матеріалів, дерев'яних будівель, пускових установок з обслуговуючим персоналом тощо) [7–17].

З огляду на зазначене суттєвого практичного значення набуває попередження вимушених пожежонебезпечних руйнувань виробів у разі впливу зовнішніх термічних дій. Водночас вони мають ґрунтуватись на наукових методах визначення критичних значень параметрів термічних впливів на вироби та технологічних параметрів зарядів сумішей (співвідношення та дисперсності компонентів, коефіцієнта ущільнення суміші, діаметра та висоти заряду тощо), перевищення яких призводить до передчасних пожежонебезпечних руйнувань виробів.

Нині достатньо повно досліджено математичні моделі зовнішніх термічних впливів та розроблено методи розрахунку критичних значень їх параметрів (теплових потоків, часу їх дії) тільки для двокомпонентних піротехнічних сумішей на основі порошків кисневмісних окиснювачів (NaNO_3 , $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, KNO_3 , NiO , CuO та ін.) та металевих палих (Mg , Al , ПАМ, Ti , Zr та ін.) [2; 7; 11–12; 14; 16–17]. Зокрема,

встановлено розподіли температури за товщиною зарядів сумішей залежно від величини теплового потоку та часу його дії; через зіставлення температури поверхні заряду суміші (максимальна температура його нагріву) з температурою займання частинок металевого пального у газоподібних продуктах розкладання сумішей визначено критичні значення параметрів зовнішніх термовпливів; водночас враховано вплив на температуру займання вказаних технологічних параметрів сумішей. Що ж до розглядуваних багатокомпонентних сумішей, технологічні параметри та теплофізичні властивості яких суттєво відрізняються від вказаних двокомпонентних сумішей [12; 14], то на сьогодні такі дослідження для них не проводили.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження безпеки піротехнічних виробів та їх пожежонебезпечних властивостей здійснюються у різних країнах. У роботі [18] розглянуто різні піротехнічні склади, що використовуються в VIS та IR трасувальних боєприпасів для покращення необхідного оптичного ефекту. Ці суміші призначені для позначення напрямку кулі. Термічну поведінку композицій визначали за допомогою тестів диференціального теплового аналізу. Крім того, спектральний аналіз і візуальні дослідження були використані для оцінки світловіддачі та енергії випромінювання згоряння індикатора та встановлення ефективності композицій. Оскільки кожна добре відома суміш індикаторів, яку протестували, потребувала оптимізації, повідомлено про нову та покращену конфігурацію складу VIS та IR. Отже, оптимальна піротехнічна суміш VIS та IR для трасувальних боєприпасів вибрана з огляду на час їхнього горіння, середньої сили світла та температури горіння.

У роботі [19] зазначено, що пожежа на піротехнічному складі може призвести до одночасного ініціювання предметів, що зберігаються, незалежно від їх категорії ризику, створюючи ударну хвилю,

спричинену тиском випущеного газу. Протягом історії в магазинах піротехніки траплялися нещасні випадки. Це свідчить про високу небезпеку піротехніки через її займистість. Через брак глобального чи європейського законодавства стосовно вказівок щодо проектування сховищ піротехніки та пов'язаної з цим оцінки ризику це дослідження спрямоване на аналіз наслідків пожежі у сховищах піротехніки та встановлення можливих у всьому світі ефективних заходів запобігання та захисту для зменшення ризику вибуху та уникнення нещасних випадків у майбутньому. Спостережувані наслідки та відбитий тиск (тиск, вимірний, коли хвиля падає перпендикулярно на перетворювач), вимірний під час випробувань на вогонь на піротехнічному складі, вказують на необхідність мінімізації можливого виникнення пожеж. Обмеження гранично допустимого навантаження з урахуванням об'єму сховища (кг/м^3) знижує тяжкість наслідків у разі аварії. Однак максимально допустимі рівні повинні бути дуже низькими, щоб зробити їх використання для роздрібної торгівлі піротехнічними виробами нерентабельним. Це може бути вирішено у разі використання систем автоматичного виявлення пожежі та пожежогасіння з високою охолоджувальною здатністю, щоб запобігти поширенню на сусідні пакування завдяки швидкому виявленню.

Методи дослідження. Для дослідження впливу підвищених температур нагріву (до 800 K) та зовнішніх тисків (до 10^7 Па) на процеси займання та розвитку горіння піротехнічних виробів використовувались [3]: сучасні методи фізико-хімічного аналізу (методи кінозйомки та мікрокінозйомки, методи рентгеноструйного аналізу, безконтактні та контактні методи виміру температури), методи нелінійної теплопровідності та термостійкості, а також математичного та експериментально-статистичного моделювання, математичного й експериментально-статистичного моделювання, стандартне піротехнічне

обладнання для випробування зразків піротехнічних виробів за вказаних умов.

Розрахунки за моделями проведені у режимі реального часу та діалогу на засобах комп'ютерної техніки, що задовольняють сучасні вимоги щодо використання спеціального програмного забезпечення.

Формулювання цілей дослідження. Метою цієї роботи є уточнення математичних моделей зовнішніх термічних впливів на заряди піротехнічних нітратно-металізованих сумішей в умовах їх зберігання або транспортування, а також проведених теоретико-експериментальних досліджень зовнішніх термічних впливів на поверхню зарядів сумішей та пожежовибухонебезпечного спрацьовування піротехнічних виробів під час їх зберігання або транспортування.

Виклад основного матеріалу. Нижче наведено результати теоретичних досліджень температури на поверхнях зарядів сумішей різної геометричної форми (плоскі пластини, циліндричні стрижні, напівсферичні елементи, пластини подвійної кривизни) (рис. 1).

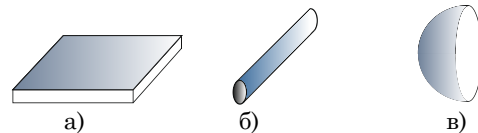


Рисунок 1 – Загальний вигляд зарядів сумішей загальнопромислових піротехнічних виробів (феєрверкові петарди та зірки, освітлювальні, сигнальні та імітувальні засоби тощо) [1–2]: плоскі пластини (а), циліндричні стрижні (б), напівсферичні елементи (в)

Розроблено (узагальнено) авторами

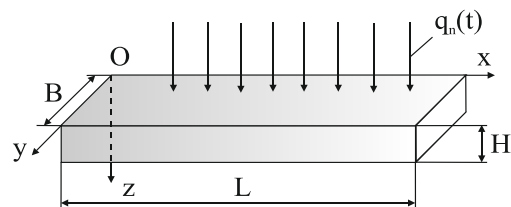


Рисунок 2 – Схема нагрівання плоскої пластини зовнішньою тепловою дією: B, H, L – ширина, товщина та довжина пластини, м; $B < L$, $H < B$; $q_n(t)$ – зовнішній тепловий потік, Вт/м^2 .

Розроблено (узагальнено) авторами

Математична модель нагріву плоскої пластини. Під час зовнішньої теплової дії на поверхню пластини надходить рівномірно розподілений тепловий потік $q_n(t)$ (рис. 2). Водночас розглядається пластина, для якої $\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} = 0$ (одномірність розподілу тепла углиб пластини), а також глибина зони термодії $\delta \approx H$ ($\delta = 2 \cdot \sqrt{a^2 \cdot \tau}$, де a^2 – коефіцієнт температуропровідності суміші (m^2/c);

τ – час зовнішньої теплової дії, с), тобто враховується теплообмін на нижньому боці пластини. Також вважається, що тепловтрати через випромінювання знехтувано малі (внаслідок малих значень температури поверхні заряду (не більше 1100...1300 K [1–2])).

Таким чином, розглядається така одномірна, нестационарна та нелінійна математична модель поверхневого нагріву пластини:

$$C_V(T(z, t)) \cdot \frac{\partial T(z, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T(z, t)) \cdot \frac{\partial T(z, t)}{\partial z} \right), \quad 0 < z < H, t > 0, \quad (1)$$

$$T(z, t)|_{t=0} = T_0, \quad (2)$$

$$\lambda(T(z, t)) \cdot \frac{\partial T(z, t)}{\partial z} \Big|_{z=H} = q_n(t), \quad (3)$$

$$\lambda(T(z, t)) \cdot \frac{\partial T(z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad (4)$$

де $T(z, t)$ – температура в різних точках z по товщині пластини в різні моменти часу t , T_0 – початкова температура пластини, K.

Для знаходження розв'язку задачі (1) – (4) врахуємо залежності об'ємної теплоємності $C_V(T)$ і коефіцієнта теплопровідності $\lambda(T)$ сумішей [1–2]:

$$C_V(T) = C_{V0} \cdot T^v, \quad \lambda(T) = \lambda_0 \cdot T^v, \quad (5)$$

де C_{V0} , λ_0 , v – емпіричні константи.

Зробимо заміну змінних

$$\theta(z, t) = T(z, t)^{v+1} - T_0^{v+1}, \quad (6)$$

Одержуємо систему рівнянь

$$\frac{\partial \theta(z, t)}{\partial t} = a_0^2 \cdot \frac{\partial^2 \theta(z, t)}{\partial z^2}, \quad (7)$$

$$\theta(z, t)|_{t=0} = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \theta(z, t)}{\partial z} \Big|_{z=H} = \bar{q}_n(t), \quad (9)$$

$$\frac{\partial \theta(z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad (10)$$

$$\text{де } \bar{q}_n = \frac{v+1}{\lambda_0} \cdot q_n(t), \quad a_0^2 = \frac{\lambda_0}{C_{V0}}. \quad (11)$$

Для розв'язання системи рівнянь (7) – (11) використовуємо стандартне косинус-перетворення Фур'є та у підсумку отримуємо для функції $\theta(z, t)$ такий вираз:

$$\theta(z, t) = \bar{q}_n \cdot \left[\frac{a_0^2 \cdot t}{H} + \frac{3z^2 - H^2}{6H} + 2H \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \cdot \frac{\cos \frac{\pi \cdot n \cdot z}{H}}{\pi^2 \cdot n^2} \cdot e^{-\left(\frac{\pi \cdot a_0 \cdot n}{H}\right)^2 \cdot t} \right]. \quad (12)$$

Враховуючи (6) та $\bar{q}_n = \frac{v+1}{\lambda_0} \cdot q_{n0}$ ($q_{n0} = \text{const}$), остаточно отримуємо

$$T(z, t) = \left\{ T_0^{v+1} + \frac{(v+1) \cdot q_{n0}}{\lambda_0} \cdot \left[\frac{a_0^2 \cdot t}{H} + \frac{3z^2 - H^2}{6H} + \frac{2H}{\pi^2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \cdot \frac{\cos \frac{\pi \cdot n \cdot z}{H}}{n^2} \cdot e^{-\left(\frac{\pi \cdot a_0 \cdot n}{H}\right)^2 \cdot t} \right] \right\}^{\frac{1}{v+1}}. \quad (13)$$

Математична модель нагріву циліндричного стрижня. Розглядаються суцільні протяжні циліндричні стрижні з

радіусом R ($R \ll D$ – довжина циліндричного стрижня) із сумішей (рис. 3). Для значень R , які

використовуються на практиці ($R = (10...30) \cdot 10^{-3}$ м), виконується умова $R \gg \delta = 2\sqrt{a_0^2 \cdot \tau}$, тобто глибина проникнення теплової хвилі у стрижень набагато менша за його радіус. Тоді цей елемент можна розглядати як необмежений циліндр, бокова поверхня якого нагрівається тепловим потоком $q_n(t)$. Вважається, що здійснюється рівномірний нагрів поверхні стрижня, тоді $\frac{\partial T}{\partial \phi} = \frac{\partial T}{\partial z} \approx 0$. Водночас тепловіддача внаслідок конвекції та радіації не враховується.

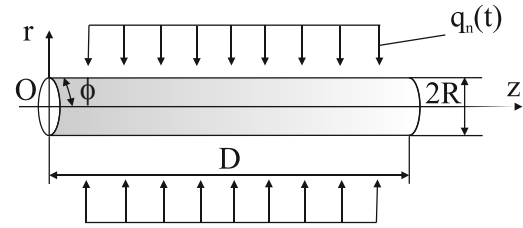


Рисунок 3 – Схема нагрівання циліндричного стрижня зовнішньою тепловою дією: R, D – радіус та довжина стрижня, м; $q_n(t)$ – поверхнева густина теплового впливу, Вт/м²; r, z, ϕ – циліндричні координати
Розроблено (узагальнено) авторами

Рівняння математичної моделі поширення тепла у необмеженому циліндричному стрижні мають вигляд :

$$C_V(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} [\lambda(T) \cdot T], \quad t > 0, 0 < r < R, \quad (14)$$

$$T|_{t=0} = T_0, \quad (15)$$

$$\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = q_n(t), \quad (16)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad T|_{r=0} \neq \infty, \quad (17)$$

де $T(r, t)$ – поточна температура залежно від радіуса та часу.

Із урахуванням $C_V(T)$ та $\lambda(T)$ (див. (5)) отримуємо

$$\frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial t} = a_0^2 \cdot \left(\frac{\partial^2 \tilde{\theta}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial r} \right), \quad (18)$$

$$\tilde{\theta}|_{t=0} = 0, \quad (19)$$

$$\frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial r} \Big|_{r=R} = \tilde{q}_n(t), \quad (20)$$

$$\frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad \tilde{\theta}|_{r=0} \neq \infty, \quad (21)$$

$$\text{де } \tilde{\theta} = T^{v+1} - T_0^{v+1}, \quad (22)$$

$$\tilde{q}_n(t) = \frac{q_n(t) \cdot (v+1)}{\lambda_0}. \quad (23)$$

Із використанням відомих вище методів інтегральних перетворень (перетворення Лапласа по змінній r) та з урахуванням співвідношення $\tilde{q}_n(t) = \text{const}$ отримуємо розв'язок системи (18) – (21), як :

$$\tilde{\theta}(r, t) = \tilde{q}_n \cdot R \cdot \left[\frac{2a_0^2 \cdot t}{R^2} - \frac{1}{4} \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{r^2}{R^2} \right) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot I_0(\mu_n \frac{r}{R})}{\mu_n^2 \cdot I_0(\mu_n)} \cdot e^{-\left(\frac{\mu_n \cdot a_0}{R} \right)^2 \cdot t} \right], \quad (24)$$

де μ_n – корні характеристичного рівняння $I_1(\mu) = 0$; I_0, I_1 – функції Беселя відповідно нульового та першого порядку.

Із урахуванням (22), (23) та $q_n(t) = q_{n0} = \text{const}$ отримуємо:

$$T(r, t) = \left\{ T_0^{v+1} + \frac{(v+1) \cdot q_{n0} \cdot R}{\lambda_0} \cdot \left[\frac{2a_0^2 \cdot t}{R^2} - \frac{1}{4} \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{r^2}{R^2} \right) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot I_0(\mu_n \frac{r}{R})}{\mu_n^2 \cdot I_0(\mu_n)} \cdot e^{-\left(\frac{\mu_n \cdot a_0}{R} \right)^2 \cdot t} \right] \right\}^{\frac{1}{v+1}}, \quad (25)$$

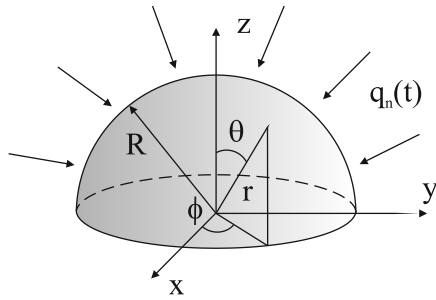


Рисунок 4 – Схема нагрівання напівсферичного елемента зовнішньою тепловою дією: R_w – радіус елемента, м; $q_n(t)$ – поверхнева густина теплового впливу, Вт/м²; r, θ, ϕ – сферичні координати

Розроблено (узагальнено) авторами

Ряд у виразі (25) достатньо швидко сходиться, тому для практичних розрахунків обмежуються декількома членами ряду (звичайно у межах 5 або 6). Для проведення розрахунків функції Беселя $I_0(\mu_n)$, $I_0\left(\mu_n \cdot \frac{r}{R}\right)$ з високим ступенем точності (відносна похибка не

Рівняння математичної моделі поширення тепла у напівсферичному елементі мають вигляд :

$$\frac{\partial \bar{T}(r,t)}{\partial t} = a^2 \cdot \left(\frac{\partial^2 \bar{T}(r,t)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial \bar{T}(r,t)}{\partial r} \right), \quad 0 < r < R_w, \quad t > 0 \quad (26)$$

$$\bar{T}|_{t=0} = f(r), \quad (27)$$

$$\left. \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} \right|_{r=R_w} = \frac{1}{\bar{\lambda}} \cdot q_n(t), \quad (28)$$

$$\left. \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad (29)$$

де $\bar{T} = T^{\gamma+1}$, $f(r)$ – деякий початковий розподіл температури по товщині обтічника; $\bar{\lambda} = \frac{\lambda_0}{\nu+1}$ (з урахуванням (5)).

Для розв'язання задачі (26) – (29) використовуємо кінцеве інтегральне перетворення Фур'є [22–23]:

$$r \cdot \bar{T}(r,t) \rightarrow F_p(p,t) = \int_0^{R_w} r \cdot \bar{T}(r,t) \cdot \frac{\sin(p,r)}{p} dr, \quad (30)$$

де значення параметра p знаходяться з рівняння:

$$\sin(p \cdot R_w) - p \cdot R_w \cdot \cos(p, r) = 0. \quad (31)$$

перевищує $10^{-5}\%$) апроксимуються поліномами [24–25].

Математична модель нагріву напівсферичного елемента. Розглядаються суцільні напівсферичні елементи з радіусом R_w (рис. 4). Для використовуваних на практиці значень R_w ($R_w = (20 \dots 60) \cdot 10^{-3}$ м) виконується умова $R_w \gg \delta = 2 \cdot (a_0^2 \cdot \tau)^{\frac{1}{2}}$, тобто глибина проникнення теплової хвилі в елемент набагато менше його радіуса, тоді його можна розглядати як симетричний сферичний елемент, зовнішня поверхня якого нагрівається тепловим потоком $q_n(t)$. Розглядається тепловий потік, який рівномірно розподілений по зовнішній поверхні зразка ($\frac{\partial T}{\partial \phi} = \frac{\partial T}{\partial \theta} = 0$). В цьому разі ми маємо симетричне відносно центра сфери температурне поле $T(r,t)$, тобто температурні поля верхньої та нижньої напівсфер однакові. Вважається, що конвективні та радіаційні тепловтрати знехтувано малі.

Зворотний перехід від зображення $F_p(p, t)$ до його оригіналу $\bar{T}(r, t)$ здійснюється за формулою

$$F_p(p, t) \rightarrow \bar{T}(r, t) = \frac{3}{R_w^3} \cdot F_p(0, t) + \frac{2}{R_w} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{p_n}{\sin^2(p_n \cdot R_w)} \cdot \frac{\sin(p_n \cdot r)}{r} \cdot F_s(p, t). \quad (32)$$

Застосуємо перетворення (30) і врахуємо умову (29), тоді отримаємо розв'язок, як:

$$\begin{aligned} \bar{T}(r, t) = & \frac{3}{R_w^3} \cdot \int_0^{R_w} r^2 \cdot f(r) \cdot dr + \frac{3 \cdot a_0^2}{\lambda \cdot R_w} \cdot \int_0^t q_n(\tau) \cdot d\tau + \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{p_n}{\sin^2(p_n \cdot R_w)} \cdot \frac{\sin(p_n \cdot r)}{p_n} \cdot e^{-a_0^2 \cdot p_n^2 \cdot t} \cdot \frac{2}{R_w} \cdot \int_0^{R_w} r \cdot f(r) \cdot \frac{\sin(p_n \cdot r)}{p_n} \cdot dr + \\ & + \frac{a_0^2}{\lambda} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{R_w p_n \cdot \sin(p_n \cdot R_w)}{p_n \cdot \sin^2(p_n \cdot R_w)} \cdot \frac{\sin(p_n \cdot r)}{r} \cdot e^{-a_0^2 \cdot p_n^2 \cdot t} \cdot \frac{2}{R_w} \cdot \int_0^t q_n(\tau) \cdot e^{a_0^2 \cdot p_n^2 \cdot \tau} \cdot d\tau. \quad (33) \end{aligned}$$

Позначаючи $\mu_n = p_n \cdot R_w$ та використовуючи рівняння

$$\sin \mu = \mu \cdot \cos \mu, \quad (34)$$

розв'язками якого є нескінченний ряд чисел $\mu_1 = 7,7251$; $\mu_2 = 10,9037$; $\mu_3 = 14,0656$; $\mu_4 = 17,2203$, остаточно отримаємо розв'язок:

$$\begin{aligned} \bar{T}(r, t) = & \frac{3}{R_w^3} \cdot \int_0^{R_w} r^2 \cdot f(r) \cdot dr + \frac{3 \cdot a_0^2}{\lambda \cdot R_w} \cdot \int_0^t q_n(\tau) \cdot d\tau + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot R_w}{\mu_n^2 \cdot \cos(\mu_n)} \cdot \frac{\mu_n \cdot \sin\left(\frac{\mu_n \cdot r}{R_w}\right)}{r} \cdot e^{-\left(\frac{\mu_n \cdot a_0}{R_w}\right)^2 \cdot t} \cdot \\ & \int_0^t q_n(\tau) \cdot e^{\left(\frac{\mu_n \cdot a_0}{R_w}\right)^2 \cdot \tau} \cdot d\tau. \quad (35) \end{aligned}$$

Для випадку (реалізованого на практиці), що розглядається, якщо

$$T(r, 0) = f(r) = T_0, \quad q_n(t) = q_{n0} = \text{const}, \quad (36)$$

одержуємо такий розв'язок розглядуваної задачі:

$$T(r, t) = \left\{ T_0^{v+1} + \frac{q_{n0} \cdot R_w \cdot (v+1)}{\lambda_0} \cdot \left[\frac{3 \cdot a_0^2 \cdot t}{R_w^2} - \frac{3 \cdot R_w^2 - 5 \cdot r^2}{10 \cdot R_w^2} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n^2 \cdot \cos(\mu_n)} \cdot \frac{R_w \cdot \sin\left(\frac{\mu_n \cdot r}{R_w}\right)}{r \cdot \mu_n} \cdot e^{-\left(\frac{\mu_n \cdot a_0}{R_w}\right)^2 \cdot t} \right] \right\}^{\frac{1}{v+1}} \quad (37)$$

Визначення критичних значень параметрів зовнішніх термічних впливів, перевищення яких призводить до передчасного займання та вибухонебезпечного розвитку горіння зарядів сумішей та пожежонебезпечного руйнування виробів. Отримані формули (15), (25) та (37) за допомогою відомих фізико-технічних характеристик сумішей, а також стандартного програмного забезпечення [1] дають змогу проводити розрахунки в діалоговому режимі та режимі реального часу на сучасних ПК розподілів температур у поверхневих

шарах широкого класу зарядів багатокомпонентних нітратно-металізованих сумішей різної геометричної форми та розмірів (плоскі пластини, циліндричні стрижні, напівсферичні елементи) залежно від основних параметрів зовнішніх термодій (величини теплового потоку q_n та часу його дії t), яким можуть піддаватись піротехнічні вироби за їх зберігання та транспортування (наприклад, в умовах пожежі у складських приміщеннях, де зберігаються вироби або під час їх транспортування в умовах

займання навколишніх палих матеріалів з високими температурами полум'я (табл. 1)).

Унаслідок проведених досліджень (рис. 5–7) встановлено, що зростання теплового потоку q_n від $1,9 \cdot 10^5$ Вт/м² до $3,6 \cdot 10^6$ Вт/м² призводить до зростання температури поверхні заряду T_n (максимальної температури у разі поверхневого нагрівання сумішей) у 5...6 разів, у разі часу термічного впливу $t = 40 \dots 50$ с, а за $t \geq 60 \dots 70$ с відбувається різке зростання T_n (більше ніж у 10...20 разів).

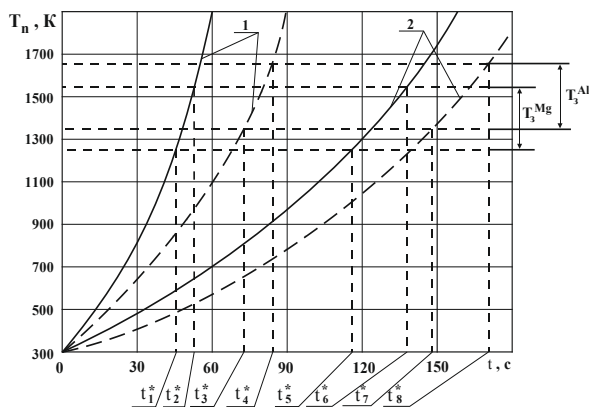


Рисунок 5 – Залежності температури поверхні заряду суміші як плоскої пластини від зовнішнього теплового потоку q_n та часу його дії t : 1 – $q_n = 3,6 \cdot 10^6$ Вт/м²; 2 – $q_n = 1,9 \cdot 10^5$ Вт/м²; — суміш на основі Mg + NaNO₃; ---- – Al + NaNO₃

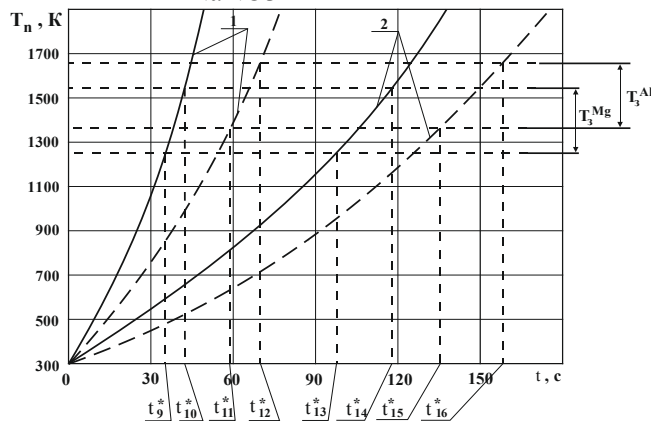


Рисунок 6 – Залежності температури поверхні заряду суміші як циліндричного стрижня від зовнішнього теплового потоку q_n та часу його дії t : 1 – $q_n = 3,6 \cdot 10^6$ Вт/м²; 2 – $q_n = 1,9 \cdot 10^5$ Вт/м²; — суміш на основі Mg + NaNO₃; ---- – Al + NaNO₃

Розроблено (узагальнено авторами)

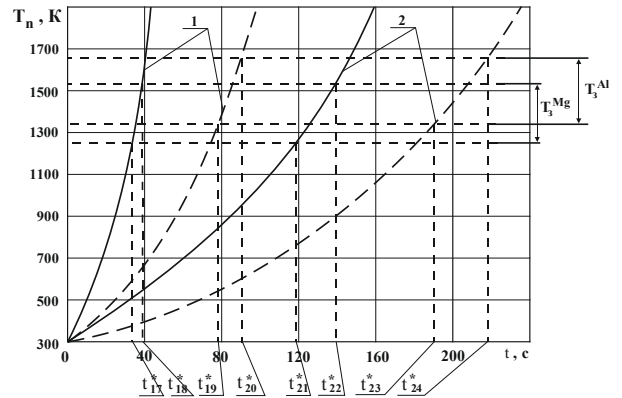


Рисунок 7 – Залежності температури поверхні заряду суміші як напівсферичного елемента від зовнішнього теплового потоку q_n та часу його дії t : 1 – $q_n = 3,6 \cdot 10^6$ Вт/м²; 2 – $q_n = 1,9 \cdot 10^5$ Вт/м²; — суміш на основі Mg + NaNO₃; ---- – Al + NaNO₃

Розроблено (узагальнено) авторами

Як пожежонебезпечні термодії на поверхню піротехнічних виробів на основі розглядуваних нітратно-металізованих сумішей в умовах їх зберігання та транспортування беруться дії, що мають критичні значення параметрів (значення зовнішніх теплових потоків від одиничних джерел тепла (q_{nj}^* , $j = 1, 2, \dots$) та часу їх теплового впливу (t_j^* , $j = 1, 2, \dots$), за яких температури поверхонь зарядів сумішей задовольняють такі умови:

$$T_n > T_3^i, \quad i=1, 2, \dots, \quad (38)$$

де T_n – температура поверхні заряду суміші; T_3^i – температура, за якої починається саморозігрів заряду i -ї суміші внаслідок процесу екзотермічного окиснення металевих пального у газоподібних продуктах термічного розкладання окиснювача та добавок розглядуваних речовин (так звана температура займання T_3 частинок металів у активних газоподібних продуктах [1; 8; 17]), яка залежить від технологічних параметрів сумішей (співвідношення компонентів та їх дисперсності) та зовнішніх умов (температури, тиску навколишнього середовища).

Невиконання умов (38) призводить до швидкого займання заряду суміші (в межах $10^{-3} \dots 10^{-2}$ с) з подальшим прискоренням процесу його горіння в умовах зростаючих температур нагріву та зовнішніх тисків, що спричиняє передчасне спрацювання та пожежонебезпечне руйнування виробів та викид у навколишнє середовище

високотемпературних (до 3000...4000 К [1–2]) конденсованих продуктів згоряння (високотемпературного конденсату), а також нагрітих частин зарядів, що не згоріли, які здатні спалахувати та руйнувати навколишні об'єкти [1–2; 5].

Таблиця 1 Значення температур полум'я та ступені їх чорноти основних палих матеріалів [1–2]

№	Пальний матеріал	Температура полум'я, К	Ступінь чорноти
1	Торф, мазут	1273	0,88
2	Деревина, буре вугілля, сира нафта, дизельне паливо, тракторний гас	1373...1423	0,6
3	Кам'яне вугілля, каучук та вироби з нього, бензин	1473...1523	0,9
4	Антрацит, сірка	1573	0,6
5	Горючі гази	1773...1973	0,7
6	Метали	> 2373...2623	0,45

Примітка. Діапазон зміни зовнішнього теплового потоку $q_n = 1,9 \cdot 10^5 \dots 3,6 \cdot 10^6$ Вт/м².

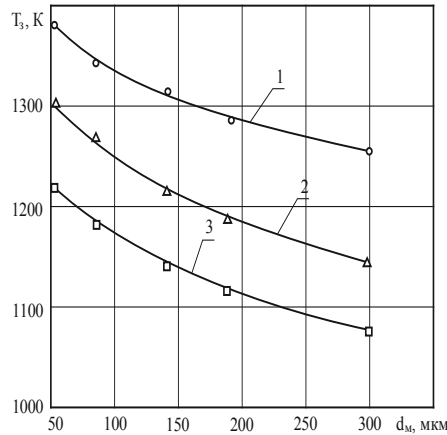
Аналіз досліджень поведінки компонентів розглядуваних сумішей в умовах підвищених температур нагріву дають змогу встановити такі особливості високотемпературного окиснення та займання частинок Mg та Al в активних окиснювальних середовищах (O_2 , $O_2 + N_2$, CO , CO_2 та ін.), які є основними газоподібними продуктами розкладання $NaNO_3$ та розглядуваних добавок за температур, притаманних к-фазі сумішей за умов горіння (1100...1300 К) [1–2]. Добавки неорганічних речовин (фториди металів) за вказаних температур не розкладаються та є практично інертними [1]. Процес їх розкладання та участь у хімічних реакціях відбувається вже у зоні полум'я та суттєво впливають на температуру продуктів згоряння сумішей та вміст у них високотемпературного конденсату. Крім цього, встановлено, що основним активним газоподібним продуктом розкладання сумішей є O_2 (відносна масова концентрація $C_{O_2} = 0,4 \dots 0,5$), а решта активних газоподібних продуктів розкладання сумішей становлять

соті частки CO_2 та не надають суттєвого впливу на T_3^i . Наявні дані є обмеженими та не дають змоги комплексно оцінювати вплив на T_3^i таких важливих параметрів, як середній розмір частинок металевих пального (d_m , мкм), відносний масовий вміст кисню у газоподібних продуктах розкладання сумішей (CO_2) та тиск навколишнього середовища (P , Па), що характеризують їх здатність до прискорення процесу займання та розвитку горіння в умовах підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків [1–2].

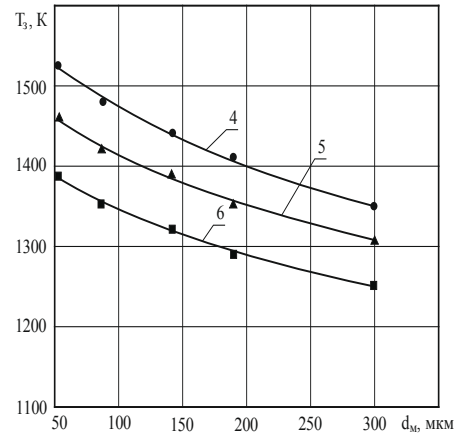
Унаслідок проведених досліджень встановлено, що для використовуваних на практиці діапазонів зміни розглядуваних параметрів (d_m , CO_2 , P) процеси займання частинок металів протікають стабільно та не мають вибухового характеру. Усі дослідження проводились на стандартному піротехнічному обладнанні з використанням відомих методик [1]. За температуру займання (T_3 , К) частинок металів у газоподібному середовищі, що нагріваються, брали їх мінімальну температуру, за якої починався процес їх горіння. Крім цього, зміна вказаних керованих параметрів суттєво впливає на характер поведінки температури займання частинок металів: збільшення d_m і CO_2 призводить до зменшення T_3 відповідно у 1,2...1,3 раза та у 1,1...1,2 раза (для частинок Mg); у 1,15...1,2 раза та у 1,2...1,25 раза (для частинок Al), а збільшення P – до зростання T_3 у 1,25...1,35 раза (для частинок Mg) та у 1,2...1,25 раза (для частинок Al) (рис. 8–10).

Отримані експериментальні дані (рис. 8–10) дали змогу встановити діапазони змін температури займання частинок металів у газоподібних продуктах термічного розкладання сумішей: $T_3 = 1250 \dots 1530$ К – для частинок магнію ($54 \leq d_m \leq 305$ мкм; $0,4 \leq C_{O_2} \leq 0,6$; $10^5 \leq P \leq 10^7$ Па); $T_3 = 1370 \dots 1680$ К – для частинок алюмінію ($54 \leq d_m \leq 310$ мкм; $0,4 \leq C_{O_2} \leq 0,6$; $10^5 \leq P \leq 10^7$ Па).

Порівнюючи отримані вище діапазони температури T_p із вказаними діапазонами зміни температур T_3^i , можна встановити, що, дійсно, тільки за певних значень розглядуваних параметрів зовнішніх термодій (q_{nj}^* ($j = 1, 2, \dots$) та t_j^* ($j = 1, 2, \dots$)) значення температури T_p



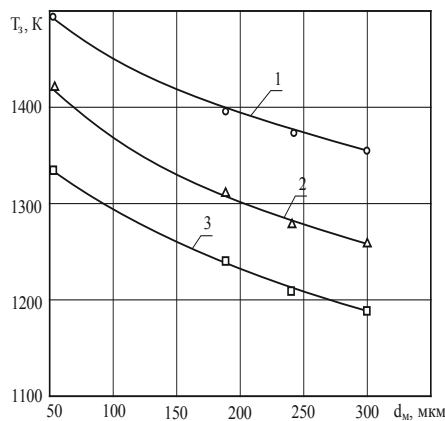
а)



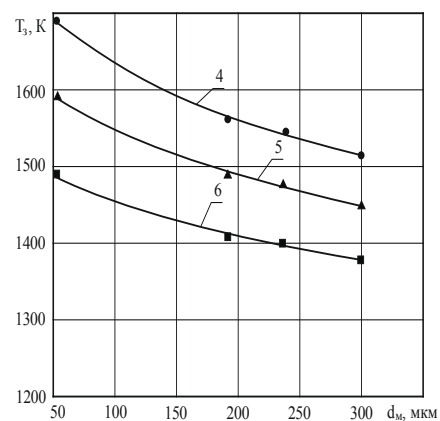
б)

Рисунок 8 – Вплив відносної масової концентрації кисню (а) та зовнішнього тиску (б) на залежність температури займання частинки магнію у газоподібних продуктах розкладання сумішей від її середнього розміру: а) – вплив C_{O_2} ($P = 10^5$ Па); 1 – $C_{O_2} = 0,4$; 2 – $C_{O_2} = 0,5$; 3 – $C_{O_2} = 0,6$; б) – вплив P ($C_{O_2} = 0,4$); 4 – $P = 10^7$ Па; 5 – $P = 10^6$ Па; 6 – $P = 10^5$ Па; $\circ$, $\bullet$, Δ , $\blacktriangle$, $\blacksquare$ – експериментальні дані

Зіставлення отриманих розрахункових значень параметрів q_{nj}^* та t_j^* ($j = 1, 2, \dots$) з отриманими експериментальними даними (рис. 11–13) показує, що відмінності між ними не перевищують 6...8%.



а)



б)

Рисунок 9 – Вплив відносної масової концентрації кисню (а) та зовнішнього тиску (б) на залежність температури займання частинки алюмінію у газоподібних продуктах розкладання сумішей від її середнього розміру: а) – вплив C_{O_2} ($P = 10^5$ Па); 1 – $C_{O_2} = 0,4$; 2 – $C_{O_2} = 0,5$; 3 – $C_{O_2} = 0,6$; б) – вплив P ($C_{O_2} = 0,4$); 4 – $P = 10^7$ Па; 5 – $P = 10^6$ Па; 6 – $P = 10^5$ Па; $\circ$, $\bullet$, Δ , $\blacktriangle$, $\blacksquare$ – експериментальні дані

Розроблено (узагальнено) авторами

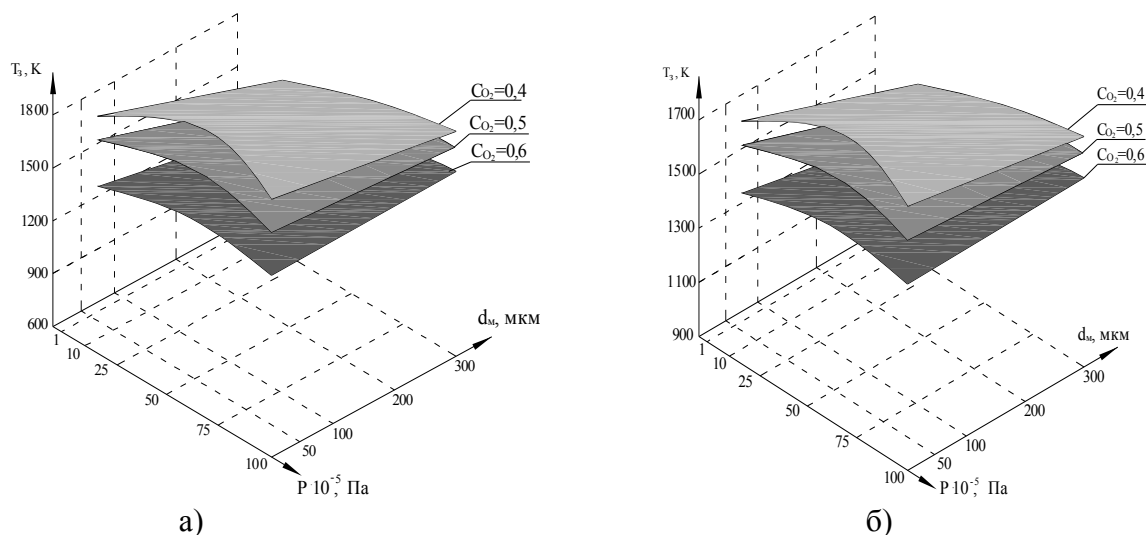
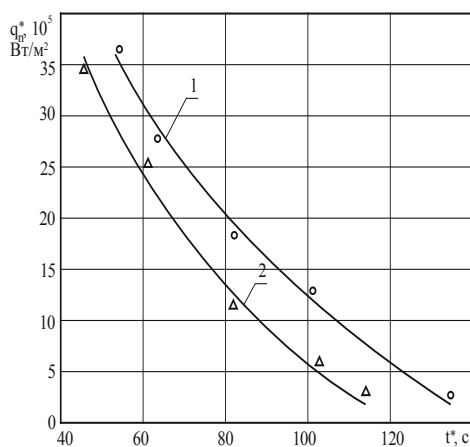


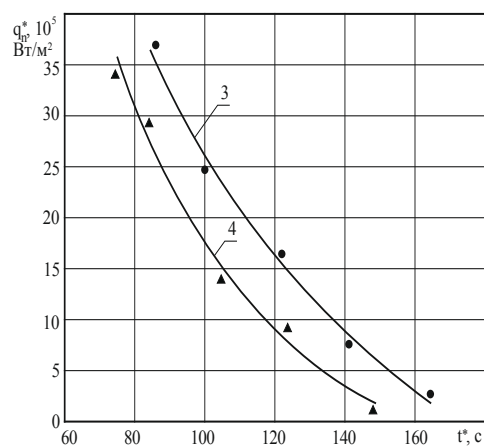
Рисунок 10 – Зображення залежностей температури займання частинок магнію (а) та алюмінію (б) у газоподібних продуктах розкладання сумішей від CO_2 , d_m та P

Нагрів зарядів сумішей, що призводить до їх спрацювання здійснювався на стандартному піротехнічному обладнанні [1] з використанням керованого ІЧ-нагріву кварцовими лампами типу

Розроблено (узагальнено) авторми КГМ-220-1000-1 із застосуванням РИФ-101 для контролю температури на поверхні суміші в діапазоні 300...1900 К та зовнішніх теплових потоків в діапазоні $10^5 \dots 10^7 \text{ Вт/м}^2$ [2].



а)



б)

Рисунок 11 – Залежності $q_p^*(t^*)$ заряду суміші на основі $\text{Mg} + \text{NaNO}_3$ (а) та $\text{Al} + \text{NaNO}_3$ (б) як плоскої пластини ($\text{CO}_2 = 0,6$; $P = 10^5 \text{ Па}$): 1 – $d_m = 54 \text{ мкм}$ (Mg); 2 – $d_m = 305 \text{ мкм}$ (Mg); 3 – $d_m = 56 \text{ мкм}$ (Al); 4 – $d_m = 310 \text{ мкм}$ (Al); ——— розрахункова крива; $\circ$, $\bullet$, Δ , $\blacktriangle$ – експериментальні дані

Розроблено (узагальнено) авторами

Нагрів зарядів сумішей, що призводить до їх спрацювання здійснювався на стандартному піротехнічному обладнанні [1] з використанням керованого ІЧ-нагріву кварцовими лампами типу

КГМ-220-1000-1 з застосуванням РИФ-101 для контролю температури на поверхні суміші в діапазоні 300...1900 К та зовнішніх теплових потоків в діапазоні $10^5 \dots 10^7 \text{ Вт/м}^2$ [2].

Таблиця 2 Діапазони зміни критичних значень зовнішніх теплових потоків q_{nj}^* ($j = 1, 2, \dots$) та часів їх дії t_j^* ($j = 1, 2, \dots$) на заряди сумішей різної геометричної форми

Суміш \ Параметр	q_{nj}^* , Вт/м ²	t_j^* , с
Суміш на основі Mg + NaNO ₃ (заряд у вигляді плоскої пластини)	$3,6 \cdot 10^6$	$t_1^* > 47$ за $T_n > (T_3^{Mg})_{\min} = 1250$ K
		$t_2^* > 53$ за $T_n > (T_3^{Mg})_{\max} = 1530$ K
	$1,9 \cdot 10^5$	$t_5^* > 113$ за $T_n > (T_3^{Mg})_{\min} = 1250$ K
		$t_6^* > 135$ за $T_n > (T_3^{Mg})_{\max} = 1530$ K
Суміш на основі Mg + NaNO ₃ (заряд у вигляді циліндричного стрижня)	$3,6 \cdot 10^6$	$t_9^* > 32$ за $T_n > (T_3^{Mg})_{\min} = 1250$ K
		$t_{10}^* > 43$ за $T_n > (T_3^{Mg})_{\max} = 1530$ K
	$1,9 \cdot 10^5$	$t_{13}^* > 96$ при $T_n > (T_3^{Mg})_{\min} = 1250$ K
		$t_{14}^* > 119$ при $T_n > (T_3^{Mg})_{\max} = 1530$ K
Суміш на основі Mg + NaNO ₃ (заряд у вигляді напівсферичного елемента)	$3,6 \cdot 10^6$	$t_{17}^* > 35$ за $T_n > (T_3^{Mg})_{\min} = 1250$ K
		$t_{18}^* > 39$ за $T_n > (T_3^{Mg})_{\max} = 1530$ K
	$1,9 \cdot 10^5$	$t_{21}^* > 117$ за $T_n > (T_3^{Mg})_{\min} = 1250$ K
		$t_{22}^* > 141$ за $T_n > (T_3^{Mg})_{\max} = 1530$ K
Суміш на основі Mg + NaNO ₃ (заряд у вигляді пластини подвійної кривизни)	$3,6 \cdot 10^6$	$t_{25}^* > 49$ за $T_n > (T_3^{Mg})_{\min} = 1250$ K
		$t_{26}^* > 61$ за $T_n > (T_3^{Mg})_{\max} = 1530$ K
	$1,9 \cdot 10^5$	$t_{29}^* > 137$ за $T_n > (T_3^{Mg})_{\min} = 1250$ K
		$t_{30}^* > 163$ за $T_n > (T_3^{Mg})_{\max} = 1530$ K
Суміш на основі Al + NaNO ₃ (заряд у вигляді плоскої пластини)	$3,6 \cdot 10^6$	$t_3^* > 72$ за $T_n > (T_3^{Al})_{\min} = 1370$ K
		$t_4^* > 84$ за $T_n > (T_3^{Al})_{\max} = 1680$ K
	$1,9 \cdot 10^5$	$t_7^* > 143$ за $T_n > (T_3^{Al})_{\min} = 1370$ K
		$t_8^* > 162$ за $T_n > (T_3^{Al})_{\max} = 1680$ K
Суміш на основі Al + NaNO ₃ (заряд у вигляді циліндричного стрижня)	$3,6 \cdot 10^6$	$t_{11}^* > 59$ за $T_n > (T_3^{Al})_{\min} = 1370$ K
		$t_{12}^* > 74$ за $T_n > (T_3^{Al})_{\max} = 1680$ K
	$1,9 \cdot 10^5$	$t_{15}^* > 135$ за $T_n > (T_3^{Al})_{\min} = 1370$ K
		$t_{16}^* > 158$ за $T_n > (T_3^{Al})_{\max} = 1680$ K
Суміш на основі Al + NaNO ₃ (заряд у вигляді напівсферичного елемента)	$3,6 \cdot 10^6$	$t_{19}^* > 78$ за $T_n > (T_3^{Al})_{\min} = 1370$ K
		$t_{20}^* > 92$ за $T_n > (T_3^{Al})_{\max} = 1680$ K
	$1,9 \cdot 10^5$	$t_{23}^* > 183$ за $T_n > (T_3^{Al})_{\min} = 1370$ K
		$t_{24}^* > 215$ за $T_n > (T_3^{Al})_{\max} = 1680$ K

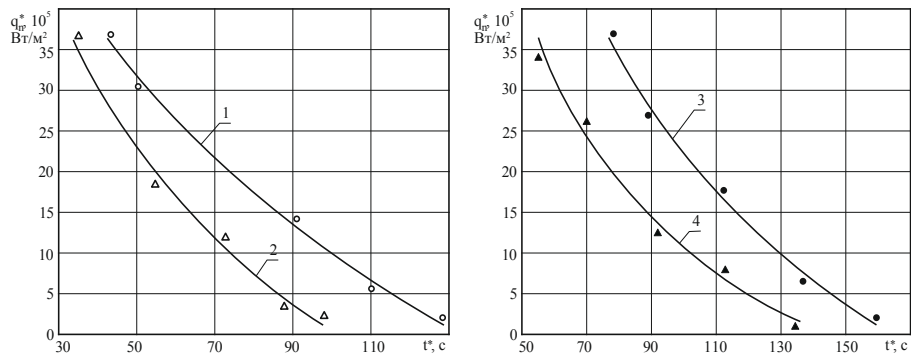


Рисунок 12 – Залежності $q_n^*(t^*)$ заряду суміші на основі Mg + NaNO₃ (а) та Al + NaNO₃ (б) у вигляді циліндричного стрижня ($C_{O_2} = 0,6$; $P = 10^5$ Па): 1 – $d_m = 54$ мкм (Mg); 2 – $d_m = 305$ мкм (Mg); 3 – $d_m = 56$ мкм (Al); 4 – $d_m = 310$ мкм (Al); ——— розрахункова крива; ○, ●, △, ▲ – експериментальні дані.

Розроблено (узагальнено) авторами

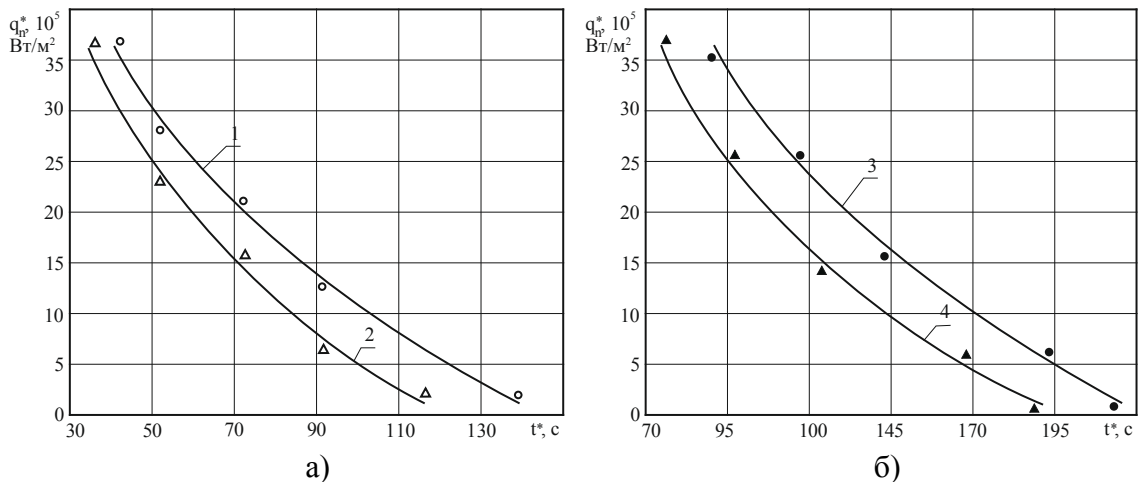


Рисунок 13 – Залежності $q_n^*(t^*)$ заряду суміші на основі Mg + NaNO₃ (а) та Al + NaNO₃ (б) у вигляді напівсферичного елемента ($C_{O_2} = 0,6$; $P = 10^5$ Па): 1 – $d_m = 54$ мкм (Mg); 2 – $d_m = 305$ мкм (Mg); 3 – $d_m = 56$ мкм (Al); 4 – $d_m = 310$ мкм (Al); ———— – розрахункова крива; ○, ●, Δ, ▲ – експериментальні дані

Висновки та напрями подальших досліджень

1. Уточнено математичні моделі зовнішніх термічних впливів на заряди піротехнічних нітратно-металізованих сумішей в умовах їх зберігання або транспортування через врахування: геометричної форми заряду суміші (плоскі пластини, циліндричні стрижні, напівсферичні елементи); термомеханічних властивостей та технологічних параметрів сумішей; температурних залежностей теплофізичних властивостей сумішей (об'ємної теплоємності $CV(T)$ та коефіцієнта теплопровідності $\lambda(T)$), що дало змогу більш точно (відносно похибку знижено до 6...8% замість 10...12% – у моделей) розраховувати розподіл температур у заряді суміші.

2. Унаслідок проведених теоретико-експериментальних досліджень зовнішніх термічних впливів на поверхню зарядів сумішей отримано такі нові результати: під час зростання зовнішнього

теплового потоку від $1,9 \cdot 10^5$ Вт/м² до $3,6 \cdot 10^6$ Вт/м² температура поверхні заряду (максимальна температура за поверхневого нагрівання суміші) зростає у 5...6 разів за часу термічного впливу $t > 40...50$ с, а у разі $t > 60...70$ с відбувається вже різке зростання температури (у понад 10...20 разів); розроблено науково-обґрунтований метод, який дає можливість з відносною похибкою 6...8% визначати критичні значення параметрів зовнішніх термічних дій (теплових потоків, часу їх дії), перевищення яких призводить до передчасного займання зарядів сумішей та пожежовибухонебезпечного спрацьовування піротехнічних виробів у разі їх зберігання або транспортування. Це дає змогу через використання необхідних технологічних рекомендацій, а також засобів контролю запобігати вказаним небезпечним ситуаціям.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Процессы горения металлизированных конденсированных систем : монография / В. А. Ващенко, О. В. Кириченко, Ю. Г. Лега, П. И. Заика, И. В. Яценко, В. В. Цыбулин. Київ : Наукова думка, 2008. 745 с.
2. Основи пожежної безпеки піротехнічних нітратовмісних виробів в умовах зовнішніх термовпливів / О. В. Кириченко, П. С. Пашковський, В. А. Ващенко, Ю. Г. Лега. Київ : Наукова думка, 2012.
3. Діброва О. С. Підвищення пожежної безпеки піротехнічних нітратно-титанових сумішей : автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня : 21.06.02 «Пожежна безпека» / НУЦЗ. Харків, 2020. 26 с.
4. Фатеев В. М., Приходько Ю. П., Таборов Л. І. Піротехніка : курс лекцій. Київ : Наукова думка, 2017, 470 с.
5. Kyrychenko Ie., Diadiushenko O., Kyrychenko O., Dibrova O. Investigation of the Regularities of the Influence of Technological Factors and External Conditions on the Temperature and Content of Condensed Products Oxide-Containing Mixtures. 2022. № 334. С. 115–123.
6. Марич В. М., Ревуцький А. В., Гук Р. І. Забезпечення безпеки у виробництвах, де використовується магній та його сплави. *Пожежна та техногенна безпека. Теорія, практика, інновації*. Матеріали міжнар. наук.-практич. конференції, Львів, 20–21 жовт. 2016 р. Львів : ЛДУ БЖД, 2016. С. 316–318.
7. Кириченко О. В., Діброва О. С., Мотрічук Р. Б., Тищенко Є. О., Цибулін В. В. Визначення допустимих режимів нагріву піротехнічних сумішей при їх експлуатації. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, 2018. № 2. С. 5–11.
8. Кириченко О. В., Діброва О. С., Мотрічук Р. Б., Ващенко В. А., Колінько С. О. Дослідження спалахування та горіння частинок алюмінієвомагнієвих сплавів у продуктах розкладання твердих піротехнічних палив. *Науковий вісник : Цивільний захист та пожежна безпека*, 2019. № 2(8). С. 81–85.
9. Пожежна безпека. Загальні положення : ДСТУ 8828:2019 [Чинний від 01.01.2020]. Київ : УкрНДНЦ, 2019. 84 с.
10. Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація : ДСТУ 8829:2019. [Чинний від 01.01.2020]. Київ : УкрНДНЦ, 2019. 75 с.
11. Кириченко О. В., Діброва О. С., Мотрічук Р. Б., Ващенко В. А., Колінько С. О., Бутенко Т. І., Цибулін В. В. Визначення критичних режимів розвитку процесів горіння піротехнічних нітратно-металевих сумішей в умовах зовнішніх термічних дій. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2020. № 2. С. 123–133.
12. Діброва О. С., Кириченко О. В., Мотрічук Р. Б., Ващенко В. А. Підвищення пожежної безпеки піротехнічних нітратно-металевих сумішей в умовах зовнішніх термічних дій. *International Scientific Journal «Intenauka»*. 2020. № 5/5799.
13. Діброва О. С., Кириченко О. В., Мотрічук Р. Б., Ващенко В. А. Закономірності впливу технологічних параметрів на пожежну безпеку піротехнічних нітратно-титанових сумішей в умовах зовнішніх термічних дій. *International Scientific Journal «Intenauka»*. 2020. № 5/5798.
14. Dibrova O., Kyrychenko O., Motrychuk R., Tomenko M., Melnyk V. Fire safety improvement of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under external thermal conditions. *Technology audit and production reserves*. 2020. № 1/1 (51). Р. 44–49.
15. Кириченко Є. П. Дослідження процесів зовнішніх термоударних дій на піротехнічні металооксидні вироби в умовах пострілу та польоту. *Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України «Надзвичайні ситуації : попередження та ліквідація»*. 2021. № 2. С. 37–51.
16. Кириченко Є. П. Методика визначення критичних значень параметрів зовнішніх термічних дій на піротехнічні металооксидні вироби в умовах експлуатації. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2022. № 2. С. 53–63.
17. Кириченко Є. Дослідження процесів займання та розвитку горіння двокомпонентних піротехнічних сумішей з порошків магнію, алюмінію та оксидів металів при підвищених температурах нагріву та зовнішніх тисках. *Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України «Надзвичайні ситуації : попередження та ліквідація»*, 2022. Т. 6. № 1. С. 29–42.
18. Pulpea B. G., Nuță C.-V., Pulpea D., Rotariu A., Trană E., Toader G., Rotariu T., Dîrloman F., Șomoiaș P., Ungureanu M. I. Characterization of pyrotechnic composition used in tracer ammunitions. *UPB Scientific Bulletin, Series B : Chemistry and Materials Science*, 2023 Volume 85. № 2, С. 185–198.
19. León, David, Castells, Blanca, Amezcua, Isabel, Casín, Juan, García-Torrent, Javier, Experimental Quantification of Fire Damage Inside Pyrotechnic Stores. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2023, Volume 13, Issue 10, 6181

REFERENCES

1. Vashchenko, V. A., Kyrychenko, O. V., Leha, Yu. H., Zayka, P. I., Yatsenko, Y. V., Tsybulin, V. V (2008). Protsessy gorennya metallizirovannykh kondensirovannykh system [Combustion processes of metallized condensed systems]. Kyiv: Naukova dumka. [In Russian].
2. Kyrychenko, O. V., Pashkovskiy, P. S., Vashchenko, V. A., Leha Yu. H (2012). Osnovy pozhezhnoyi bezpeky pirotekhnichnykh nitratovmisykh vyrobiv v umovakh zovnishnykh termovplyviv [Basics of fire safety of pyrotechnic nitrate-containing products in conditions of external thermal effects. Kyiv: Naukova dumka. [In Ukrainian]
3. Dibrova, O. S. (2020) Pidvyshchennya pozhezhnoyi bezpeky pirotekhnichnykh nitratno-tytanovykh sumishey [Increasing the fire safety of pyrotechnic nitrate-titanium mixtures]. (Extended abstract of candidate's thesis). National University of Civil Defense. Kharkiv [in Ukrainian].
4. Fatieiev, V. M., Prykhodko, Yu. P., Taborov, L. I. (2017) Pirotechnika [Pyrotechnics]. Kyiv: Naukova dumka. [In Ukrainian].
5. Kyrychenko, Ie., Diadiushenko, O., Kyrychenko, O., Dibrova, O. (2022). Investigation of the Regularities of the Influence of Technological Factors and External Conditions on the Temperature and Content of Condensed Products Oxide-Containing Mixtures. *Solid State Phenomena*, 334, 115–123. doi:10.4028/p-kww878 [in English].
6. Marych, V. M., Revuts'kyi, A. V., Huk, R. I. (2016). Zabezpechennya bezpeky u vyrobnytstvakh, de vykorystovuyet'sya mahniy ta yoho splavy [Ensuring safety in industries where magnesium and its alloys are used], *Pozhezhna ta tekhnohenna*

- bezpeka. Teoriya, praktyka, innovatsiyi, materialy Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi [Fire and technological safety. Theory, practice, innovations. Materials of the International Scientific and Practical Conference]. Lviv. [in Ukrainian].
7. Kyrychenko, O. V., Dibrova, O. S., Motrichuk, R. B., Tyshchenko, YE. O., Tsybulin V. V. (2018). Vyznachennya dopustymykh rezhymiv nahrivu pirotekhnichnykh sumishey pry yikh ekspluatatsiyi [Determination of permissible modes of heating of pyrotechnic mixtures during their operation]. Visnyk Cherkas'koho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu, 2, 5 – 11, doi: <https://doi.org/10.24025/2306-4412.2.2018> [in Ukrainian].
8. Kyrychenko, O. V., Dibrova, O. S., Motrichuk, R. B., Vashchenk, V. A., Kolin'ko, S. O. (2019). Doslidzhennya spalakhuvannya ta horinnya chastynok alyuminiyevomahniyevykh splaviv u produktakh rozkladannya tverdykh pirotekhnichnykh palyviv [Research on ignition and burning of particles of aluminum-magnesium alloys in decomposition products of solid pyrotechnic fuels]. Naukovyy visnyk: Tsyvil'nyy zakhyst ta pozhezhna bezpeka, 2(8), 81–85, doi: <https://doi.org/10.33269/nvcs.2019.2> [in Ukrainian].
9. Pozhezhna bezpeka. Zahalni polozhennia [Fire Security. Terms]. (2019). DSTU 8828:2019 from January 2020 Kyiv: UkrNDICZ [in Ukrainian].
10. Pozhezhovybukhonebezpechnist rehovyn i materialiv. No-menklatura pokaznykiv i metody yikhnoho vyznachennia. Klasyfikatsiia [Fire and explosion hazard of substances and materials. Nomenclature of indicators and methods of their determination. Classification]. (2019). DSTU 8829:2019 from January 2020 Kyiv: UkrNDICZ [in Ukrainian].
11. Kyrychenko, O. V., Dibrova, O. S., Motrichuk, R. B., Vashchenko, V. A., Kolin'ko, S. O., Butenko, T. I., Tsybulin, V. V. (2020). Vyznachennya krytychnykh rezhymiv rozvytku protsesiv horinnya pirotekhnichnykh nitrato-metalevykh sumishey v umovakh zovnishnikh termichnykh diy [Determination of critical modes of development of combustion processes of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under conditions of external thermal effects]. Visnyk Cherkas'koho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu, 2, 123–133, doi: <https://doi.org/10.24025/2306-4412.2.2020> [in Ukrainian].
12. Dibrova, O. S., Kyrychenko, O. V., Motrichuk, R. B., Vashchenko, V. A. (2020). Pidvyshchennya pozhezhnoyi bezpeky pirotekhnichnykh nitrato-metalevykh sumishey v umovakh zovnishnikh termichnykh diy [Patterns of influence of technological parameters on the fire safety of pyrotechnic nitrate-titanium mixtures in conditions of external thermal actions], Mizhnarodnyy naukovyy zhurnal «Internauka», 5/5798, doi: 10.15587/2312-8372.2020.199252 [in Ukrainian].
13. Dibrova, O. S., Kyrychenko, O. V., Motrichuk, R. B., Vashchenko, V. A. (2020). Zakonomirnosti vplyvu tekhnolohichnykh parametriv na pozhezhnu bezpeku pirotekhnichnykh nitrato-tytanovykh sumishey v umovakh zovnishnikh termichnykh diy [Patterns of influence of technological parameters on the fire safety of pyrotechnic nitrate-titanium mixtures in conditions of external thermal actions], Mizhnarodnyy naukovyy zhurnal «Internauka», 5/5798. doi: 10.15587/2312-8372.2020.199252 [in Ukrainian].
14. Dibrova, O., Kyrychenko, O., Motrichuk, R., Tomenko, M., Melnyk, V. (2020) Fire safety improvement of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under external thermal conditions. Technology audit and production reserves, 1/1(51), 44–49, doi: 10.15587/2312-8372.2020.199252 [in English].
15. Kyrychenko, Ye. P. (2021) Doslidzhennya protsesiv zovnishnikh termoudarnykh diy na pirotekhnichni metalooksydni vyroby v umovakh postrilu ta pol'otu [Research of the processes of external thermoshock actions on pyrotechnic metal oxide products under the conditions of shot and flight], Zbirnyk naukovykh prats' Cherkas'koho instytutu pozhezhnoyi bezpeky im. Heroyiv Chornobylya Natsional'noho universytetu tsyvil'noho zakhystu Ukrayiny «Nadzvychni situatsiyi: poperedzhennya ta likvidatsiya», 2, 37–51, doi: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2021.5.2-37-50> [in Ukrainian].
16. Kyrychenko, Ye. P. (2022). Metodyka vyznachennya krytychnykh znachen' parametriv zovnishnikh termichnykh diy na pirotekhnichni metalooksydni vyroby v umovakh ekspluatatsiyi [Methodology for determining the critical values of the parameters of external thermal effects on pyrotechnic metal oxide products under operating conditions], Visnyk Cherkas'koho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu, 2, 53-63, doi: <https://doi.org/10.24025/2306-4412.2.2022> [in Ukrainian].
17. Kyrychenko, Ye. P. (2022). Doslidzhennya protsesiv zaymannya ta rozvytku horinnya dvokomponentnykh pirotekhnichnykh sumishey z poroshkiv mahniyu, alyuminiyu ta oksydiv metaliv pry pidvyshchenykh temperaturakh nahrivu ta zovnishnikh tyskakh [Investigation of the processes of ignition and development of combustion of two-component pyrotechnic mixtures of magnesium, aluminum and metal oxide powders at elevated heating temperatures and external pressures], Zbirnyk naukovykh prats' Cherkas'koho instytutu pozhezhnoyi bezpeky imeni Heroyiv Chornobylya NUTSZ Ukrayiny «Nadzvychni situatsiyi: poperedzhennya ta likvidatsiya», Volume 6, 1, 29-42, doi: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2022.6.1> [in Ukrainian].
18. Pulpea, B. G., Nuță, C.-V., Pulpea, D., Rotariu, A., Trană, E., Toader, G., Rotariu, T., Dîrloman, F., Șomoiaș, P., Ungureanu, M. I. (2023). Characterization of pyrotechnic composition used in tracer ammunitions. UPB Scientific Bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science, Volume 85, 2, 185–198
19. León, D., Castells, B., Amez, I., Casín, J., García-Torrent, J. (2023). Experimental Quantification of Fire Damage Inside Pyrotechnic Stores. Applied Sciences (Switzerland), Volume 13, Issue 10, 6181, doi:10.3390/app13106181.

DETERMINATION OF CRITICAL VALUES OF PARAMETERS OF EXTERNAL THERMAL EFFECTS ON PYROTECHNIC PRODUCTS BASED ON NITRATE-METAL MIXTURES IN THE CONDITIONS OF THEIR STORAGE AND TRANSPORTATION

N. Koziar, O. Kyrychenko, V. Kovbasa, O. Diadiushenko, V. Vaschenko, S. Kolinko

Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes National University of Civil Defence of Ukraine, Ukraine

KEYWORDS:

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

ANNOTATION

The properties of pyrotechnic products for various purposes (signaling and tracing devices, pyrotechnic flares, rocket and space technology elements, etc.) based on multicomponent compacted mixtures of metal propellants powders (magnesium, aluminum, aluminum-magnesium alloys (AMA), etc.), nitrate-containing oxidizers (nitrates of alkali and alkaline earth metals, etc.) and additives of various organic (paraffin, stearin, naphthalene, anthracene, urotropin, iditol, etc.) and inorganic substances (metal fluorides, etc.). It has been established that during storage and transportation, they can be exposed to intense external thermal effects (e.g., fires in warehouses where products are stored, fires in nearby flammable objects, in combat zones, etc.), resulting in premature ignition of the charges of the mixtures, which leads to the destruction of products with the formation of high-temperature combustion products (up to 3000...4000 K), which fly in different directions and pose a fire hazard to surrounding objects (fuels and lubricants, wooden buildings, launchers with service personnel, etc.) Mathematical models of external thermal effects on the surface of charges of nitrate-metallized mixtures with additives of organic and inorganic substances for pyrotechnic products for various purposes in storage or transportation conditions have been developed, taking into account the geometric shape of the charges (flat plates, cylindrical rods and hemispherical elements); thermomechanical properties and technological parameters of the mixture; temperature dependences of the thermophysical properties of the mixtures. The temperature distributions in the charges of the mixtures were calculated and the critical values of the external heat flux and its action time were determined, the excess of which leads to premature ignition of the charges of the mixtures, explosive development of their combustion and, ultimately, to the fire-hazardous destruction of pyrotechnic products and surrounding objects.

УДК 351.861

ОСОБЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ СИСТЕМИ АКУСТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ ДЖЕРЕЛ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ У КОНТЕКСТІ РОЗВИТКУ КОНЦЕПЦІЇ «SMART CITY»

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2.58-76>

Тютюник В. В.^{1*}, ORCID iD 0000-0001-5394-6367

Тютюник О. О.², ORCID iD 0000-0002-3330-8920

Усачов Д. В.¹ ORCID iD 0000-0002-1140-9798

*E-mail: tutunik_v@ukr.net

¹Національний університет цивільного захисту України, Україна

²Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

АНОТАЦІЯ

Надійшла до редакції: 09.10.2023

Пройшла рецензування: 26.10.2023

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

Smart city, Safe city, надзвичайна ситуація, безпека життєдіяльності міста, система акустичного моніторингу надзвичайних ситуацій, контроль акустичного простору міста, спектральний аналіз, пасивна локація джерел небезпек, система ситуаційних центрів, ухвалення управлінських антикризових рішень.

Викладено основні принципи створення в моделі «Safe city» системи «Smart city» підсистеми контролю акустичного простору міста з подальшим отриманням й обробкою інформації, а також прогнозуванням виникнення на території міста надзвичайних ситуацій (далі – НС) різного характеру та розробленням ефективних управлінських антикризових рішень. Системний підхід використання спектрального аналізу акустичного середовища міста, який був запропонований для створення цієї підсистеми, слугує підґрунтям для подальших досліджень, спрямованих на створення ефективної системи контролю акустичного простору та контрольованої локації джерел небезпеки на прилеглий території.

Постановка проблеми. Сучасні міста як частини системи державного управління є складними та розгалуженими структурами, які згідно з даними [1–6] розташовані у просторі та часі та мають різні параметри життєдіяльності, такі як чисельність населення (невелика, мала, середня, велика тощо) і різноманітні функції, такі як промислові, транспортні, наукові, історичні та багатогалузеві.

Розвиток інфраструктури, будівництво доріг та комунікаційних систем мають значущий вплив на рівень розвитку міст. Згідно з прогнозами експертів ООН у найближчі 15 років збільшення міського населення триватиме і може становити понад 60% від загального населення Землі.

Крім того, місто не є просто скупченням матеріальних об'єктів, таких як житлові і промислові будівлі, комунікаційні мережі тощо; це цілісна, складна та динамічна система, в якій спільно діють люди, природа, економіка і суспільство.

Але важливо враховувати, що міста відповідно до даних [7–13] у процесі свого функціонування та розвитку можуть створювати передумови для виникнення небезпек, які можуть негативно впливати на стан навколишнього середовища, економічну ситуацію та соціально-політичний баланс як на території міста, так і в регіоні, а також можуть загрожувати національним інтересам.

Один зі способів підвищення безпеки в сучасних містах – це створення ситуаційних центрів у рамках концепції Smart city. Ці центри за даними [14–16] мають бути обладнані ефективною геоінформаційною системою для моніторингу міської території з метою виявлення та ідентифікації джерел різноманітних небезпек.

Водночас в Україні згідно з [17–21] функціонує єдина державна система цивільного захисту (далі – ЄДСЦЗ) з метою виконання державної політики у сфері цивільного захисту. Вона

складається з функціональних та територіальних підсистем і спрямована на розв'язання завдань забезпечення безпеки території держави, зокрема у разі НС.

Залишаються відкритими для держави питання щодо впровадження системного підходу та застосування даних [22] у функціях моніторингу й розроблення ефективних управлінських рішень в ЄДСЦЗ щодо попередження, локалізації та ліквідації наслідків НС, які виникають внаслідок різних видів небезпек [23].

Це вказує на необхідність негайного введення в структуру ЄДСЦЗ різних функціональних компонентів територіальної підсистеми моніторингу НС та складових ситуаційних центрів на всіх рівнях від об'єктового до державного. За даними [24] ця інтеграція на рівнях інформаційної та виконавчої діяльності спрямована на ухвалення відповідних антикризових рішень для розв'язання різних завдань моніторингу, запобігання та ліквідації НС природного, техногенного, соціального та воєнного характеру.

Таким чином, одним із актуальних напрямів розвитку концепції «Smart city» є розроблення у ЄДСЦЗ підсистем ситуаційних центрів та моніторингу НС. Функціональною основою цих підсистем є створення елементів штучного інтелекту щодо автоматизованого виявлення на території міста джерел небезпек, з подальшою обробкою даних для інформаційної підтримки ухвалення антикризових рішень щодо запобігання, локалізації та ліквідації наслідків НС природного, техногенного, соціального та воєнного характеру.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У багатьох наукових публікаціях як вітчизняних, так і іноземних приділяється увага дослідженню концепції «Smart city». В цих розвідках поняття «розумне місто» визначається як система управління міською інфраструктурою, яка використовує інформаційні та комунікаційні технології, спільно з Інтернетом речей (далі – IoT). Крім того,

концепція «Smart city» включає в себе роботу ІТ-додатків, які дають змогу мешканцям міста використовувати державні послуги.

Так, згідно з [25–32] основна ідея концепції «Smart city» полягає в підвищенні ефективності функціонування міста. Основними характеристиками розумного міста є: розумна економіка, розумна мобільність, розумне ставлення до навколишнього середовища, розумні мешканці, розумний спосіб життя та розумне управління. Це надає можливості виділити шість основних показників смартекономіки міста: здатність до інновацій, рівень розвитку підприємництва, економічний образ і бренд міста, економічна продуктивність, гнучкість ринку праці та участь у міжнародних економічних процесах.

Для визначення рівня смартмобільності враховують такі фактори, як можливість безпечного переміщення в усі райони міста, доступність міста на національному і міжнародному рівнях, доступність ІКТ-інфраструктури, зокрема мережі «Інтернет», а також стійка, інноваційна та безпечна транспортна система.

Крім того, розвиток сучасного міста, як показано на рис. 4, неможливий без урахування екологічних аспектів. Отже, розумні міста характеризуються елементами, які відображають відповідальний підхід до довкілля, зокрема рівень забруднення повітря, рівень обурення станом навколишнього середовища та рівень розвитку сталого використання ресурсів.

Головною складовою розумного міста є самі громадяни, тому успішність розвитку міста безпосередньо залежить від їх освіти, бажання навчатися, гнучкості та готовності до активної участі в суспільному житті.

Під час проведення аналізу розумного способу життя розглядаються умови, що формують резидентів розумного міста, такі як наявність культурних споруд, стан здоров'я населення, рівень безпеки громадян, якість

житла та якість комунальних послуг, доступність освіти, привабливість для туристів та соціальна спільнота міста.

Під час дослідження складової «Smart governance» виділяються три ключові фактори, які вказують на ефективне управління містом: участь громадян в ухваленні рішень щодо життя та розвитку міста, функціонування громадських і соціальних служб, прозорість у діяльності органів управління.

Автоматизація цих процесів згідно з даними [33–37] можлива за допомогою застосування спеціальних датчиків та програмних продуктів. Водночас для збору та аналізу інформації можуть використовуватися різні системи, такі як «Smart metering» (інтелектуальні лічильники), системи управління відходами, розумне освітлення, екологічний моніторинг тощо. Ці системи можуть надавати детальну інформацію для ефективного моніторингу та управління міськими ресурсами, що дає змогу реагувати на виникнення аварійних ситуацій та забезпечувати безперебійне функціонування міста.

Так, Smart metering – це інтелектуальні лічильники, які здійснюють докладний аналіз споживчих показників та надають можливість якісно моніторити інформацію для обчислення комунальних послуг. Крім цього, система, заснована на датчиках тиску, може виявити наявність аварій на конкретних ділянках водопроводу та газопроводу й автоматично повідомити відповідні комунальні служби. Це дає їм змогу оперативно втрутитися у ситуацію та провести необхідні ремонтні роботи, мінімізуючи збитки.

Система управління відходами (Waste management) містить процеси збору, транспортування та обробки відходів з метою мінімізації негативного впливу відходів на природне середовище та здоров'я громадян. Крім того, в систему управління відходами входить використання спеціальних датчиків у смітєвих контейнерах, які аналізують інформацію про рівень наповненості та

надсилають сигнали, коли необхідно вивезти вміст контейнера. Це дає змогу здійснювати раціональний розподіл робочої сили та техніки, що сприяє підвищенню ефективності використання ресурсів комунальних служб міста.

Система розумного освітлення дає змогу налагодити міське освітлення та зробити простір більш безпечним за умов зниження витрат на оплату електроенергії. Це можливо реалізувати за допомогою оснащення вуличних ліхтарів лампами зі спеціальними датчиками руху. Датчики також можуть регулювати рівень освітленості залежно від пори року.

Екологічний моніторинг теж належить до проєктів «Smart city», які включають довгострокові спостереження за станом навколишнього середовища та дають змогу спрогнозувати небезпечні зміни як природних, так і техногенних чинників.

Управління світлофорами надає можливість організувати безпечний та зручний рух автотранспорту в місті. Ця система за допомогою автоматизації визначає можливість руху на дорогах залежно від щільності руху автотранспорту, що дає змогу зменшити кількість аварійних ситуацій на автошляхах та дорожньо-транспортних пригод у місті, а також збільшити рівень комфорту керування транспортними засобами.

У систему «розумна зупинка» входять електронні дисплеї, які відображають інформацію про рух автобусів і тролейбусів. Ці дисплеї показують, скільки часу залишилося до прибуття міського транспорту. Крім того, висвітлюється інформація про рівень заторів на дорогах.

Розумний паркінг є незамінною технологією для мегаполісів, яка активно використовується в країнах ЄС. До складу цієї системи входять спеціальні датчики, що допомагають знайти вільне місце та припаркувати машину, а також проконтролювати оплату за паркування.

Smart ticket – це ще одна популярна технологія, яка полегшує користування

громадським транспортом, надаючи можливість пасажиром оплачувати свої квитки онлайн. Це сприяє підвищенню комфорту оплати проїзду, а також посиленню контролю за пасажирським громадським транспортом.

Разом із перерахованими вище підсистемами, які спрямовані на підвищення якості функціонування комунальних служб міста та комфорту життєдіяльності його мешканців, до концепції «Smart city» має входити підсистема «Safe city». На сьогодні основними складовими цієї підсистеми є лише камери зовнішнього спостереження, які мають фіксувати небезпечні події та допомагати у розслідуванні злочинів, зокрема пограбувань, нападів, викрадень машин тощо.

Зворотним боком розміщення територією міста лише великої кількості камер зовнішнього спостереження є низька ефективність роботи операторів служб безпеки міста щодо обробки отриманої інформації, а внаслідок цього несвоєчасне виявлення джерел небезпек та велика інерційність ухвалення ефективних антикризових рішень.

Ці обставини вказують на необхідність інтегрування в підсистему Safe city додаткових автоматизованих датчиків контролю різних джерел небезпек, які працюють на різних фізико-хімічних принципах. Розроблення такої системи моніторингу джерел НС дасть змогу об'єднати функції спостереження та обробки інформації про джерела небезпеки, а також функції прогнозування виникнення на території міста НС різного характеру (з напрацюванням ефективних управлінських антикризових рішень надалі) в єдиний центр управління службами безпеки та комунальними службами міста.

Одним із напрямів раннього виявлення на території міста джерел НС різного характеру згідно з даними [38–39] є контроль акустичного простору міста за допомогою наземних стаціонарних

автоматичних аналізаторів сигналів у акустичному діапазоні.

Формулювання цілей дослідження. Метою дослідження є розвиток науково-технічних основ розроблення в межах концепції «Safe city» системи автоматизованих засобів для контролю акустичного простору та пасивного визначення джерел потенційної небезпеки з подальшим отриманням та обробкою інформації, а також прогнозування виникнення на території міста НС і напрацювання ефективних управлінських антикризових рішень.

Особливості функціонування в моделі «Safe city» системи моніторингу акустичного простору території міста досліджено за допомогою використання методу структурно-функціонального моделювання, який реалізовано через застосування програмного продукту Ramus educational за стандартом IDEF0 [40–41]. Цей програмний продукт має змогу надати алгоритм процесу як діаграми та наочно показати послідовність процесів забезпечення відповідного рівня життєдіяльності міста в умовах наступного завдання: визначити сутність структурно-функціонального підходу з використанням стандарту IDEF0 і побудувати модель для опису процесу спостереження та обробки інформації про джерела небезпеки, а також прогнозування виникнення на території міста НС різного характеру з подальшим розробленням ефективних управлінських антикризових рішень.

Результати структурно-функціонального моделювання дали змогу створити наочну модель та відтворити учасників процесу забезпечення відповідного рівня життєдіяльності міста. Це допомогло розробити послідовність дій щодо стратегічного розвитку в загальній системі «Smart city» підсистеми «Safe city» з урахуванням створення на території міста системи моніторингу акустичного простору його території, керуючих потоків нормативно-правової бази та наявності відповідних механізмів (ресурсів).



Рисунок 1 – Контекстна діаграма системи функціонування міста

Джерело: розробка авторів

Моделювання процесів забезпечення відповідного рівня життєдіяльності міста проведено у декілька етапів. На першому етапі здійснено побудову контекстних діаграм функціонування міста (блок A0 на рис. 1) з подальшою декомпозицією його процесів (рис. 2). На цих діаграмах наведено: вхідні (соціальні, енергетичні, фінансові, транспортні та матеріально-технічні) потоки; вхідні (фінансові, природні, техногенні, соціальні, військові та інформаційні) загрози для нормального функціонування міста; вихідні потоки, які характеризуються

соціально-демографічними та фінансово-економічними показниками; вихідні потоки, які характеризуються рівнями економічної, соціальної, інформаційної, екологічної, науково-технічної, військової безпеки та рівнем виникнення НС у місті; механізми та керуючі впливи. До механізмів впливу належать: місцеві органи влади, служби міста; служби безпеки міста, а до управлінського впливу – законодавство України, постанови та розпорядження Кабінету Міністрів України, укази та розпорядження Президента України, розпорядження виконавчої влади.

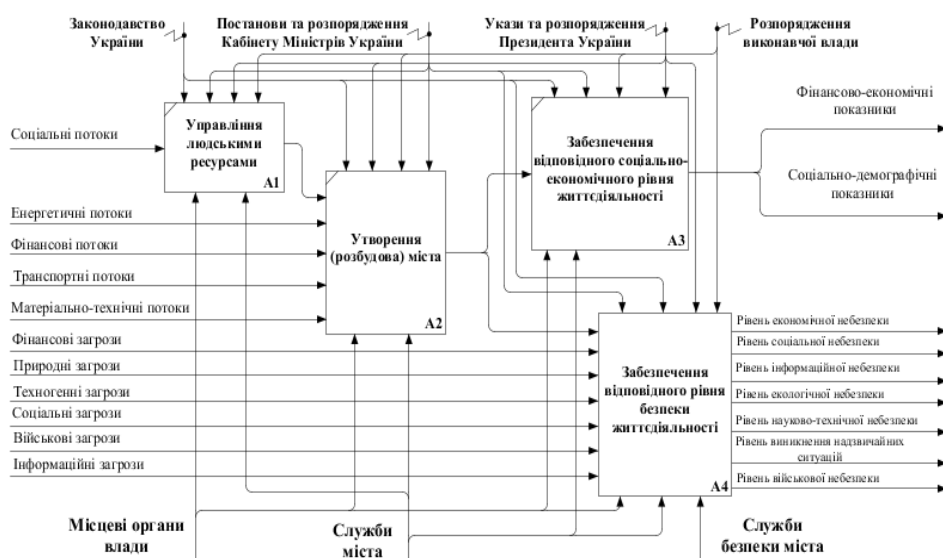


Рисунок 2 – Діаграма декомпозиції системи функціонування міста

Джерело: розробка авторів

На рис. 2 наведено діаграму декомпозиції як результат послідовного етапу моделювання за методологією IDEF0 процесів функціонування міста. Модель містить такі етапи: управління людськими ресурсами; утворення (розбудова) міста; забезпечення відповідного соціально-економічного рівня життєдіяльності; забезпечення відповідного рівня безпеки життєдіяльності. Система державного управління людськими ресурсами (блок А1) може бути умовно поділена на три основних блоки. До першого із них належать органи, які відповідають за соціальний розвиток і стежать за постійним покращенням громадського харчування, побутового обслуговування, житлово-комунального господарства, торгівлі продовольчими та промисловими товарами, а також за охороною здоров'я. Другий блок охоплює міністерства і відомства, які відповідають за державне управління демографічними процесами, а також у сферах освіти, професійної орієнтації, зайнятості, праці та соціального забезпечення. До третього блоку входить орган управління державною службою, який відповідає за підбір, підготовку, розстановку і раціональне використання державних службовців. Ці службовці відповідають за ефективне функціонування перших двох блоків системи управління людськими ресурсами.

Процес утворення (розбудови) міста (блок А2) має відбуватися в умовах реалізації концепцій креативної економіки на регіональному та місцевому рівнях. Особливостями реалізації цієї концепції є: зниження потужності факторів розвитку індустріального міста, зміна пріоритетів до залучення креативного класу; підвищення уваги до кваліфікації, адаптації, мобільності робочої сили; посилення значущості якості життя, забезпечення соціальної стабільності та захищеності населення; поглиблення міжнародного співробітництва не тільки на державному рівні, а й налагодження тісної співпраці між містами; оновлення інфраструктури, заснованої на використанні найсучасніших інформаційних технологій; підвищення

швидкості, чутливості і гнучкості ухвалення рішень; інноваційність та міжкультурність розвитку; зростання інтересу до якості освіти населення та підсилення науково-технічного та науково-дослідного потенціалу державних інститутів та бізнес-структур, налагодження їх тісної взаємодії.

Для створення креативного міста необхідно забезпечити відповідний соціально-економічний контекст (блок А3), який містить: підтримку та розвиток високотехнологічного підприємництва; забезпечення інвестицій в людський капітал і підтримку креативного підприємництва; підтримку та сприяння науковим та дослідним розробкам; оптимізацію культурних та суспільних послуг із вільним доступом до них; широке використання інформаційних технологій у сфері державного управління та застосування інноваційних підходів для досягнення поставлених цілей; створення умов для покращення якості життя мешканців міста; поліпшення комунікації між різними формами підприємництва та забезпечення тісних зв'язків із галузями мистецтва та культури.

Забезпечення відповідного рівня безпеки життєдіяльності міста досягається через виявлення, запобігання, послаблення, усунення і відвернення загрози, здатної призвести до соціальних та екологічних збитків, знищення матеріальних та духовних цінностей, перешкоджання їх прогресивному розвитку (блок А4).

Так, на рис. 3 наведено діаграму декомпозиції процесу забезпечення відповідного рівня безпеки життєдіяльності міста. Модель містить такі етапи: реєстрацію загроз для життєдіяльності міста; аналіз та систематизацію інформації про загрози; формування бази даних про загрози; моделювання та прогнозування розвитку небезпек для життєдіяльності міста; оцінку рівня цих небезпек та ухвалення антикризового управлінського рішення; виконання ухваленого антикризового рішення.

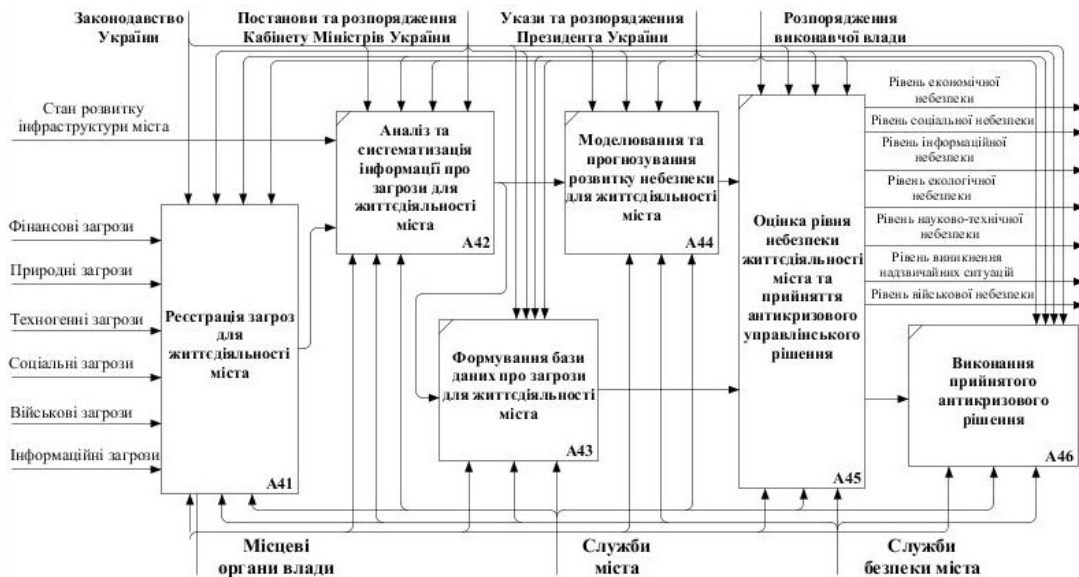


Рисунок 3 – Діаграма декомпозиції процесу забезпечення відповідного рівня безпеки життєдіяльності міста

Джерело: розробка авторів

Реєстрація засобами контролю загрози для життєдіяльності міста здійснюється у блоці А41. Отримана інформація про фактори небезпеки на території самого міста або на об'єктах критичної інфраструктури міста проходить процес аналізу та систематизації інформації про загрози для життєдіяльності міста (блок А42). Результатом є інформація, яка оброблена та надана так, як необхідно для формування бази даних про загрози для життєдіяльності міста (блок А43), а також для моделювання та прогнозування розвитку небезпеки для життєдіяльності міста (блок А44).

Оброблена інформація у відповідному форматі передається до блоку А44, де проводиться її аналіз і систематизація, на основі чого робиться висновок щодо рівня небезпеки в місті. Забезпечення швидкодії системи є особливо важливим, та використання автоматизованих засобів обробки інформації значно прискорює цей процес і дає змогу створити електронні бази даних та знань, які доступні в реальному часі. Застосування відповідних математичних методів надає змогу моделювати небезпечні ситуації, прогнозувати їх розвиток та рівень і відображати цю

прогнозовану динаміку катастрофічних подій у вигляді графіків, зокрема використання електронних карт.

Блок А45 є системою оцінки рівня небезпеки життєдіяльності міста та підтримки ухвалення антикризових управлінських рішень. Особа, відповідальна за ухвалення рішень, визначає один або декілька критеріїв, за якими проводиться прогностичне моделювання розвитку небезпеки та розробляються альтернативні варіанти управлінських рішень, які підтримуються відповідними розрахунками. Із низки доступних управлінських рішень особа, відповідальна за ухвалення рішень, вибирає один або може встановлювати додаткові критерії, на підставі яких проводиться моделювання та розроблення управлінських рішень. Ці рішення спрямовані на запобігання небезпечному розвитку ситуації до рівня катастрофи. Якщо її не можна уникнути, розроблені управлінські рішення, спрямовані на мінімізацію наслідків. Затверджені рішення особи, відповідальної за ухвалення рішень, передаються для виконання в межах системи виконання антикризових рішень (блок А46), де вони формалізуються та надсилаються виконавцям – службам міста та службам

безпеки міста, які функціонують в рамках чинної ЄДСЦЗ.

Так, на рис. 8 наведено діаграму декомпозиції процесу реєстрації загроз для життєдіяльності міста. Модель містить такі етапи: організацію фінансового аудиту (блок A416); організацію моніторингу соціального стану (блок A415); організацію моніторингу довкілля

(блок A414); організацію відеоспостереження (блок A413); організацію радіаційного, хімічного та біологічного моніторингу (блок A412); організацію спектрального аналізу випромінювань, які виникають від джерел небезпек (блок A411). Процес формування звіту про загрози для життєдіяльності міста реалізується у блоці A417.

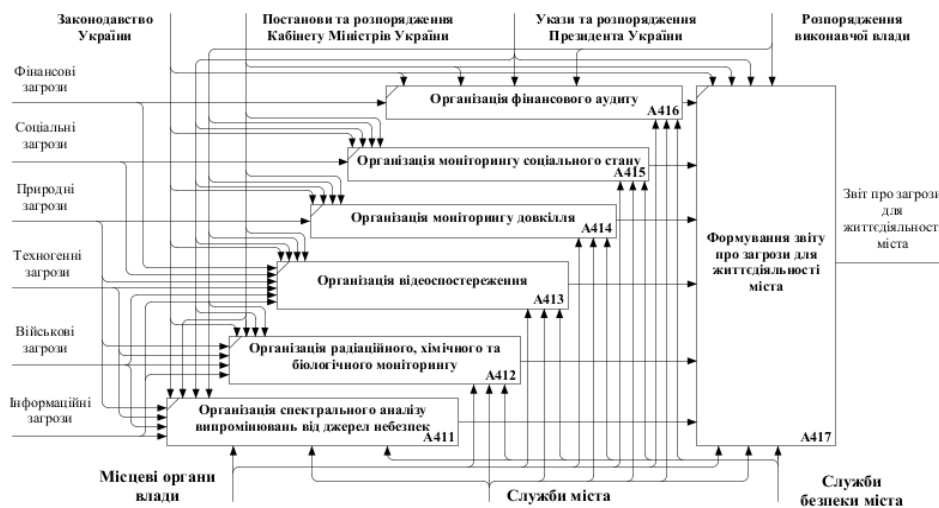


Рисунок 4 – Діаграма декомпозиції системи реєстрації загроз для життєдіяльності міста

Джерело: розробка авторів

Блок A411 є складовою системи Safe city, який має забезпечувати організацію спектрального аналізу випромінювань, які виникають від джерел небезпек з різними спектральними характеристиками, а саме: в акустичному, радіо-, інфрачервоному, оптичному, ультрафіолетовому та рентгенівському діапазонах, а також аналіз гамма- та космічних променів. Кожен із методів спектрального аналізу випромінювань від джерел небезпек у різних частотних діапазонах має як недоліки, так і переваги. Отже, не віддаючи переваги жодному з цих методів, автори у своїх дослідженнях вибрали спектральний аналіз акустичного простору з метою виявлення та ідентифікації джерел НС місцевого рівня.

Згідно з [42–43] для реалізації спектрального аналізу акустичного простору міста використовується система оперативного моніторингу, яка забезпечує безперервний та тривалий в реальному часі контроль за територією міста. Ця система об'єднує наземні автоматизовані пристрої

для контролю акустичного простору та пасивної локації джерел небезпек. Крім того, вона здатна збирати та обробляти інформацію від цих пристроїв за допомогою ситуативного центру, який відповідає за виконання антикризових рішень, спрямованих на запобігання, локалізацію та ліквідацію наслідків НС.

Методи пасивної акустичної локації джерел небезпек відповідно до [43] мають свої особливості, які можна визначити таким чином: 1) якщо немає інформації про тривалість акустичного випромінювання, неможливо точно з'ясувати відстань до джерела випромінювання лише за допомогою одного наземного засобу автоматизованого контролю акустичного простору. З огляду на це для визначення координат джерела небезпек необхідно використовувати комплекс двох або більше розташованих у різних точках простору засобів автоматизованого контролю акустичного простору, які спільно працюють і мають з'єднані канали зв'язку, утворюючи

комп'ютерну мережу; 2) приймання прямого сигналу, а не його відбитка спрощує виявлення і вимірювання координат джерела небезпеки. Однак неясність стосовно форми сигналу та можлива наявність інших джерел акустичного випромінювання ускладнюють процес оперативного моніторингу в зоні НС; 3) відсутність передавальних пристроїв за пасивної локації спрощує конструкцію апаратури, а також підвищує її енергозбереження та збереження конфіденційності.

Функціональну схему цієї системи наземних стаціонарних засобів автоматизованого контролю акустичного простору, ситуативного центру, підсистеми зв'язку та передавання телеметричної інформації, а також підсистеми виконання антикризових рішень щодо запобігання, локалізації та ліквідації наслідків НС наведено на рис. 5.

Головним показником ефективності функціонування цієї підсистеми оперативного акустичного моніторингу на території міста є достовірність ідентифікації джерела небезпеки за їх видом та місцем виникнення.

Фактори, які можуть впливати на достовірність акустичної ідентифікації джерел НС, можна відповідно до даних

джерела [44] поділити на три групи. Перша група містить фактори, які відображають динаміку змін показників розвитку джерел небезпеки, такі як тактико-технічні характеристики застосовуваних засобів, їх кількість та інтенсивність використання. Друга група факторів містить тактико-технічні характеристики засобів контролю акустичного простору, включаючи метрологічні та експлуатаційні показники засобів отримання та обробки інформації. Третя група факторів враховує географічні та фізико-хімічні характеристики місця виникнення НС і поширення акустичних сигналів у середовищі.

Розглядаючи умови, за яких акустичні хвилі від джерела НС поширюються в атмосфері, важливо враховувати велику чутливість звукового випромінювання до таких метеорологічних факторів, як швидкість та напрямок вітру, температура, вологість повітря та атмосферний тиск, а також їх зміни з висотою. Також важливі характеристики турбулентності, властивості підстильної поверхні, геометрія поширення звуку та особливості джерела звукового випромінювання значно впливають на дальність, на яку може поширюватися звук.

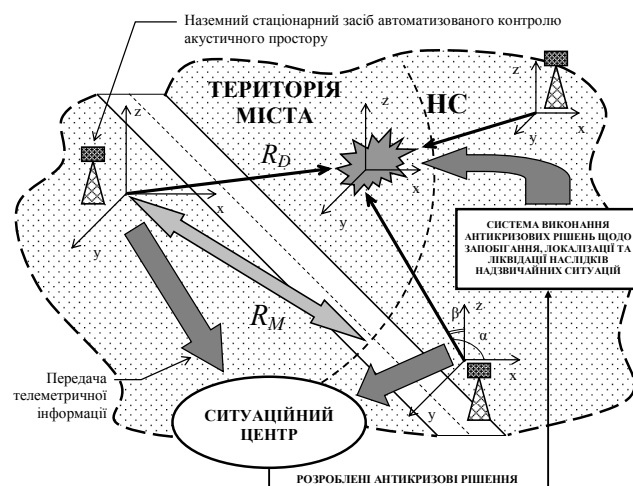


Рисунок 5 – Схема функціонування системи наземних стаціонарних засобів автоматизованого контролю акустичного простору на території міста, ситуативного центру, підсистеми зв'язку та передавання телеметричної інформації, а також підсистеми виконання антикризових рішень щодо запобігання, локалізації та ліквідації наслідків НС різного характеру на території міста

Джерело: розробка авторів

Зазвичай під час аналізу характеристик звукових хвиль, що поширюються, розглядають середній стан атмосфери, що мало змінюється протягом довжини хвилі. Але на тлі цих відносно повільних змін середовища існують різношвидкісні зміни у стані атмосфери (так звані турбулентні флуктуації метеорологічних параметрів), які зумовлюють флуктуації амплітуди і фази звукової хвилі, розсіювання звуку, додаткове ослаблення енергії випромінювання, порушення когерентності тощо.

Середні значення цих метеорологічних параметрів мають вплив як на абсолютне значення сумарного коефіцієнта поглинання звуку на фіксованій частоті f , так і на його частотній залежності. Ослаблення енергії звуку в атмосфері відбувається таким чином, що на значні відстані можуть поширюватися лише його низькочастотні складові. У разі передавання широкосмугових сигналів це явище істотно впливає на амплітудно-частотну характеристику сигналу, що приймається, а відповідно і на якість отриманої інформації.

Іншим важливим фактором, який впливає на процес приземного поширення в атмосфері акустичних хвиль, є рефракція, що виникає внаслідок неоднорідності середовища поширення хвиль та зміни швидкості звуку з висотою за рахунок змін швидкості вітру v та температури повітря T . Це явище може бути розглянуто на основі метода геометричної акустики, де використовується таке уявлення про звук як хвилі, що поширюються вздовж променевих траєкторій, кривизна яких визначається змінами з висотою швидкості вітру v і температури T , а також кутовими параметрами, що характеризують початковий напрямок випромінюваного звуку. Водночас вважаємо, що енергія звукової хвилі не залишає променеву трубку, сформовану сімейством променів, що утворює за їх поперечного перерізу замкнуту криву. З огляду на це збіжність

чи розбіжність променів (зміна діаметра променевої трубки) у геометричній акустиці безпосередньо впливає на інтенсивність звуку. Розрізняють три основні режими поширення звуку [45–46]: хвильовий, антихвильовий і як проміжний – нейтральний режим.

Нейтральний режим поширення звуку характерний для відносно невеликих відстаней та за прямої видимості. Так, у точці простору наземного стаціонарного засобу автоматизованого контролю акустичного простору відбувається інтерференція прямого (випромінюваного джерелом терористичних дій) та відбитого від поверхні Землі променів.

Під час аналізування умов, коли звук від джерела НС поширюється низько поверхнею атмосфери на великі відстані, головні параметри акустичних хвиль визначаються переважно внаслідок рефракції на градієнтах температури і швидкості вітру. Це призводить до виникнення двох режимів поширення: хвильового та антихвильового. У першому випадку звукові хвилі загинаються донизу з багаторазовим відбиттям від землі, і цей режим характеризується малими втратами звуку. У другому випадку промені звуку загинаються вгору, і відбувається формування акустичної тіні біля землі на певній відстані від джерела НС. Отже, в цю зону проникає тільки слабкий звук, який розсіюється турбулентними неоднорідностями у верхніх шарах атмосфери. Ці два режими поширення звуку переважно спостерігаються на відстанях більше 1 км.

У той же час на території великого міста має певний вплив динамічно-розгалужена система забудови, де можуть виникати різні атмосферні явища, а також є велика концентрація різних об'єктів і споруд на одиниці площі. Всі ці чинники створюють перешкоди для ефективного приймання акустичного сигналу засобами контролю акустичного простору. Зважаючи на зазначене, розглядається доцільність встановлення засобів контролю акустичного простору на відстанях менше 1 км.

За таких умов стає необхідним

проведення аналізу ефективності функціонування засобів контролю акустичного простору за слабкої рефракції звуку, яку можна розглядати як ситуацію прямого поширення звукової хвилі до точки спостереження. У цьому режимі до

Розрахунок звукового тиску в цьому разі може бути проведений за допомогою такого виразу:

$$L_{R_M}(f) = L_s(f) + L_{abs}(f) + L_t(f) + L_e(f) + L_{div}(f) + L_{pat}(f), \quad (1)$$

де R_M – радіус зони ймовірнісної акустичної ідентифікації джерела НС, $L_{R_M}(f)$ – рівень звукового тиску на вході наземного стаціонарного засобу контролю акустичного простору на частоті f від джерел НС, які виникли на межі зони достовірної акустичної ідентифікації, $L_s(f)$ – звуковий тиск від джерела НС, який перерахований до звукового тиску на відстані одного метра від джерела, $L_{abs}(f)$ – вклад класичного та молекулярного поглинання звуку в атмосфері, $L_t(f)$ – вклад турбулентного послаблення звуку, $L_e(f)$ – вклад приземного ослаблення звуку (враховується вплив інтерференції прямої та відбитої хвилі), $L_{div}(f)$ – вклад кутової розбіжності, $L_{pat}(f)$ – доданок, який враховує характеристики діаграми направленості засобу контролю акустичного простору.

Рівняння (1) виражає закон збереження енергії та являє собою рівняння енергетичного балансу. Всі члени правої частини цього рівняння, за винятком компоненту $L_s(f)$, зазвичай мають негативне значення. Для точної акустичної ідентифікації джерела небезпеки та визначення місця виникнення цього джерела на території міста необхідно враховувати такі умови: $R_D \leq R_M$.

За цих умов для визначення місця виникнення джерела НС необхідно застосувати позиційні методи локації, які засновані на використанні поверхонь або ліній положення для визначення місця виникнення джерела в просторі або на поверхні Землі. Поверхня положення є геометричним місцем точок у просторі, що відповідають умові сталості параметра (вимірюваної координати відносно

точки спостереження доходять лише два промені: прямий, який не має точки повороту, і відбитий від поверхні Землі, де кривизна траєкторій променів характеризується низькими значеннями.

розташування наземного стаціонарного засобу автоматизованого контролю акустичного простору ((дальності, кута тощо) – рис. 5). Розташування джерела НС у просторі знаходиться як точка перетину трьох поверхонь положення. Перетин двох поверхонь положення дає лінію положення, яка є геометричним місцем точок із постійними значеннями двох параметрів. Щоб визначити точку в просторі, потрібен перетин трьох поверхонь положення або лінії та поверхні положення [47].

На сьогодні відомі три основні методи визначення координат джерел випромінювання, а саме: кутомірний, різницево-далекомірний, кутомірно-різницево-далекомірний. Найбільшого поширення набули різницево-далекомірний та кутомірно-різницево-далекомірний методи. Системи пасивної локації з цими методами вимірювання координат, які використовують для визначення різниці відстаней, називають кореляційно-базовими. Особливістю пристроїв кореляційно-базової локації є аналіз за допомогою кореляторів часових запізнень τ .

Найбільш перспективним для визначення місця виникнення джерела НС є кутомірно-різницево-далекомірний метод, який заснований на вимірі кутових напрямів на джерело випромінювання та різниці відстаней від нього до місць розташування засобів контролю акустичного простору. У найпростішому випадку достатньо мати два засоби контролю. Так, для визначення площинних координат слід виміряти лише азимут β та

різницю відстаней $R = r_1 - r_2$ (рис. 6).

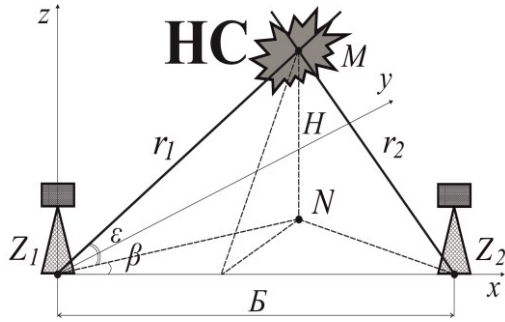


Рисунок 6 – Пасивний кутомірно-різницево-далекомірний метод акустичного визначення місця виникнення джерела НС,

де Z_1 і Z_2 – точки розташування наземних стаціонарних засобів автоматизованого контролю акустичного простору; B – відстань (база) між точками Z_1 і Z_2 ; M – точка простору, де виникло джерело НС; N – проєкція точки M на площину XY ; β і ϵ – азимут і кут міста щодо напрямку на точку M ; r_1 і r_2 – дальності до точки M від точок Z_1 і Z_2

Джерело: розробка авторів

За таких умов, базуючись на основних постулатах кутомірно-різницево-далекомірного методу (за даними рис. 6), дальність до точки виникнення джерела НС від точки розташування засобу контролю акустичного простору Z_1 визначається як:

$$r_1 = \frac{B^2 - R^2}{2(B \cos \epsilon \cos \beta - R)} \quad (2)$$

Водночас повна похибка визначення місця виникнення джерела НС є багатовимірним нестационарним випадковим процесом і функцією виду:

$$r_1 - r_1^* = \psi[M(t), S(t, u), e(t)], \quad (3)$$

де r_1^* – істинне значення дальності до точки виникнення джерела НС від точки розташування засобу контролю акустичного простору Z_1 ; $S(t, u)$ – акустичний сигнал, що має інформацію про вимірювальний параметр u ; $e(t)$ – зовнішні та внутрішні адитивні завади

для функціонування розташованого в точці Z_1 наземного стаціонарного засобу автоматизованого контролю акустичного простору; $M(t)$ – масштабний коефіцієнт (перетворення), що характеризує ефективність функціонування засобу контролю акустичного простору.

Насамкінець важливо відзначити, що загальний підхід до функціонування системи Safe city з метою забезпечення відповідного рівня життєдіяльності міста, який був розглянутий у цій роботі на прикладі наочних ілюстрацій (рис. 1–4), є фундаментом для проведення наукових досліджень. Ці розвідки спрямовані на створення ефективної системи наземних автоматизованих засобів контролю акустичного простору та пасивної локації джерел небезпеки. Зазначена система також передбачає збір і обробку інформації, прогнозування виникнення різних видів НС на території міста і розроблення ефективних антикризових управлінських рішень. Особливості функціонування такої системи наведені на рис. 5 і 6.

Висновки та напрями подальших досліджень. Викладені основні принципи створення в моделі «Safe city» системи «Smart city» підсистеми наземних автоматизованих пристроїв контролю акустичного простору та пасивної локації джерел небезпек із подальшим отриманням й обробкою інформації, а також прогнозування виникнення на території міста НС різного характеру та розроблення ефективних управлінських антикризових рішень:

1. Системний підхід і принцип оцінки небезпеки життєдіяльності території міста в умовах виникнення НС різного характеру базується на уявленнях про окрему територію, для оцінки небезпеки якої обґрунтовано використання функціональної поверхні, горизонтальні проєкції якої збігаються з конфігурацією території, а її опуклості відповідають рівням небезпеки в містах із конкретними

географічними координатами.

2. Встановлено, що одним із напрямів розвитку концепції «Safe city» є розроблення у ЄДСЦЗ місцевого рівня підсистем моніторингу НС та ситуаційних центрів, які працюють відповідно до функцій класичного контуру управління та забезпечують: збір, обробку та аналіз інформації; моделювання розвитку обстановки на території міста; розроблення та ухвалення управлінських рішень щодо попередження та ліквідації НС, а також мінімізації їх наслідків; виконання рішень щодо запобігання та ліквідації НС.

3. Розроблено (за стандартом IDEF0) структурно-функціональну модель стратегічного розвитку в загальній системі «Smart city» підсистеми «Safe city» з урахуванням керуючих потоків нормативно-правової бази України та наявності в державі відповідних механізмів (ресурсів). Під час моделювання показано, що процес реєстрації загроз для життєдіяльності міста включає організацію фінансового аудиту, моніторингу соціального стану та довкілля, відеоспостереження, радіаційного, хімічного та біологічного моніторингу, а також спектрального аналізу випромінювань від джерел небезпек. Водночас встановлено, що організація спектрального аналізу випромінювань від джерел небезпек включає комплексний аналіз характеристик випромінювань в різних частотних діапазонах (в акустичному, радіо-, інфрачервоному, оптичному, ультрафіолетовому та рентгенівському діапазонах, а також аналіз гамма- та космічних променів), де кожен із методів аналізу має як недоліки, так і переваги. З огляду на зазначене, не віддаючи переваги жодному з цих методів,

автори у своїх дослідженнях вибрали спектральний аналіз акустичного простору з метою виявлення та ідентифікації на території міста джерел НС природного, техногенного, соціального та воєнного характеру.

4. Запропоновано системний підхід та принципи використання спектрального аналізу акустичного простору міста для реалізації безперервного та тривалого у реальному масштабі часу оперативного моніторингу за місцем виникнення та динамікою розвитку ідентифікованих джерел НС різного характеру. Водночас встановлено, що основним показником ефективності функціонування підсистеми оперативного акустичного моніторингу зони НС на території міста є достовірність ідентифікації джерела небезпеки за видом та місцем виникнення, яка залежить: від факторів, котрі характеризують безпосередньо динаміку зміни показників розвитку джерела небезпеки; від факторів, які характеризують тактико-технічні показники засобів контролю акустичного простору; від факторів, які характеризуються географічними та фізико-хімічними показниками місця виникнення джерела небезпеки та середовища поширення інформаційного акустичного сигналу.

5. Запропоновані принципи використання спектрального аналізу акустичного простору міста є основою для проведення надалі досліджень, спрямованих на розроблення ефективної системи наземних автоматизованих пристроїв контролю акустичного простору та пасивної локації джерел небезпек, із подальшим отриманням й обробкою інформації, а також прогнозуванням виникнення на території міста НС різного характеру та розробленням ефективних управлінських антикризових рішень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Левчук К. О., Романюк Р. Я. Сталий розвиток міста як ключовий фактор розвитку економіки України. *Математичне моделювання*. 2022. № 1(46). С. 131–140. URL : <http://matmod.dstu.dp.ua/article/view/258455/255221> (дата звернення : 01.08.2023).
2. Назаренко Ю., Сирбу О. Стратегія розвитку міст : удосконалення підходів. Приклад Києва. URL : <https://cedos.org.ua/wp-content/uploads/stattya-strategiya-rozvytku-mist.pdf> (дата звернення : 04.09.2023).
3. Пінь А. М. Концепція розвитку міста в контексті розвитку інноваційного управління. *Соціально-економічні проблеми сучасного періоду України*. 2018. Вип. 4(132). С. 114–118. URL : [http://ird.gov.ua/sep/sep20184\(132\)/sep20184\(132\)_114_PinA.pdf](http://ird.gov.ua/sep/sep20184(132)/sep20184(132)_114_PinA.pdf) (дата звернення : 10.08.2023).

4. Чуль О. М. Концепція розбудови міст в рамках розвитку креативної економіки : методологічний та практичний аспект. *Електронний журнал «Ефективна економіка»*. URL : <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=3348> (дата звернення : 10.08.2023).
5. Жирак Р. М. Феномен життєстійкості як складова розвитку урбоєкосистем. *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*. 2022. Вип. 64. С. 179–193. URL : <http://archinform.knuba.edu.ua/article/view/267479/263335> (дата звернення : 01.09.2023).
6. Планування і забудова територій: ДБН Б.2.2-12:2018 [Чинний з 01.09.2018]. Київ : Міністерство комунального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2018. 187 с. URL : https://dbn.co.ua/pay/pub01/dbn-B-2212_planuvannya.pdf (дата звернення : 10.08.2023).
7. Про національну безпеку України : Закон України від 21.06.2018 № 2469-VIII. URL : <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2469-19> (дата звернення : 10.08.2023).
8. Про засади внутрішньої і зовнішньої політики» : Закон України від 01.08.2010 № 2411-VI. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2411-17#Text> (дата звернення : 12.08.2023).
9. Про правовий режим надзвичайного стану : Закон України від 16.03.2000 № 1550-III. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-14#Text> (дата звернення : 10.08.2023).
10. Про правовий режим воєнного стану : Закон України від 12.05.2015 № 389-VIII. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/389-19#Text> (дата звернення : 12.08.2023).
11. Про рішення Ради національної безпеки і оборони України «Про Стратегію національної безпеки України» : Указ Президента України від 14.09.2020. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/392/2020#Text> (дата звернення : 10.08.2023).
12. Науково-конструкторські основи створення комплексної системи моніторингу надзвичайних ситуацій в Україні : монографія / В. А. Андронов, М. М. Дівізінюк, В. Д. Калугін, В. В. Тютюнник. Харків : Національний університет цивільного захисту України, 2016. 319 с. URL : <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/5970> (дата звернення : 15.09.2023).
13. Тютюнник В. В., Тютюнник О. О., Удянський М. М., Ященко О. А. Кластеризація регіонів України за рівнем небезпеки та шляхи підвищення ефективності функціонування єдиної державної системи цивільного захисту в умовах невизначеності вхідної інформації про виникнення надзвичайних ситуацій. *Науковий вісник : Цивільний захист та пожежна безпека*. 2021. № 1(11). С. 75–84. URL : <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/14237> (дата звернення : 10.09.2023).
14. Щодо удосконалення мережі ситуаційних центрів та цифрової трансформації сфери національної безпеки і оборони : рішення Ради національної безпеки і оборони України від 04.06.2021. Введено в дію Указом Президента України від 18 червня 2021 року № 260/2021. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0039525-21#Text> (дата звернення : 10.08.2023).
15. Тютюнник В. В., Калугін В. Д., Писклакова О. О. Основоположні принципи створення у єдиній державній системі цивільного захисту інформаційно-аналітичної підсистеми управління процесами попередження й локалізації наслідків надзвичайних ситуацій. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава. Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка. 2018. Вип. 4(50). С. 168–177. URL : <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/7411> (дата звернення : 01.10.2023).
16. Тютюнник В. В., Калугін В. Д., Писклакова О. О. Управлінські основи створення у єдиній державній системі цивільного захисту інформаційно-аналітичної підсистеми управління процесами попередження й локалізації наслідків надзвичайних ситуацій. *Вісник Національного університету цивільного захисту України. Серія : «Державне управління»*. Харків. Національний університет цивільного захисту України. 2020. Вип. 1(12). С. 546–571. URL : <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/11625> (дата звернення : 01.10.2023).
17. Кодекс цивільного захисту України : Закон України від 02.10.2012 № 5403-VI. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text> (дата звернення : 10.08.2023).
18. Про затвердження Положення про єдину державну систему цивільного захисту : постанова Кабінету Міністрів України від 09.01.2014 № 11. URL : <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/11-2014-%D0%BF> (дата звернення : 10.08.2023).
19. Про затвердження типових положень про функціональну і територіальну підсистеми єдиної державної системи цивільного захисту : Постанова Кабінету Міністрів України від 11.03.2015 № 101. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/101-2015-%D0%BF#Text> (дата звернення : 10.08.2023).
20. Про схвалення Стратегії реформування системи Державної служби України з надзвичайних ситуацій : розпорядження Кабінету Міністрів України від 25.01.2017 № 61-р. URL : <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/61-2017-%D1%80> (дата звернення : 10.08.2023).
21. Державна система цивільного захисту / М. М. Кулешов, В. П. Садковий, В. В. Тютюнник. Харків : Друкарня Мадрид, 2020. 232 с. URL : <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/11264> (дата звернення : 15.09.2023).
22. Калугін В. Д., Тютюнник В. В., Черногор Л. Ф., Шевченко Р. І. Розробка науково-технічних основ для створення системи моніторингу, попередження та ліквідації надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру та забезпечення екологічної безпеки. *Системи обробки інформації*. Харків : Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 2013. Вип. 9(116). С. 204–216. URL : <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/2790> (дата звернення : 15.09.2023).
23. Тютюнник В. В., Калугін В. Д., Писклакова О. О. Оцінка умов створення у єдиній державній системі цивільного захисту інформаційно-аналітичної підсистеми управління процесами попередження й локалізації наслідків надзвичайних ситуацій на основі аналізу динаміки прояву небезпек на території України. *Комунальне господарство міст. Серія : Технічні науки та архітектура*. Харків. Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова. 2019. № 1(147). С. 66–82. URL : <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/10272> (дата звернення : 12.09.2023).
24. Тютюнник В. В., Ященко О. А., Рубан І. В., Тютюнник О. О. Особливості функціонування системи ситуаційних центрів на різних стадіях розвитку надзвичайних ситуацій. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. Київ : Національний університет оборони України імені Івана Черняховського, 2022. Вип. 1(43). С. 41–52. URL : <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/15894> (дата звернення : 15.09.2023).
25. SMART-інфраструктура у сталому розвитку міст: світовий досвід та перспективи України. Київ : Заповіт, 2021. 398 с. URL : <https://razumkov.org.ua/uploads/other/2021-SMART-%D0%A1YTI-SITE.pdf> (дата звернення : 02.10.2023).
26. Smart Citi Ukraine : що це та як це працює в українських реаліях. URL: <https://visitukraine.today/uk/blog/2183/smart-city-ukraine-shho-ce-ta-yak-ce-pracyuje-v-ukrainskix-realiyah> (дата звернення : 02.10.2023).
27. Касич А. О., Федоряк Р. М., Собяніна А. П. Інноваційна технологія «SMART CITY» як механізм покращення рівня життя в сучасному місті. *Науковий вісник Міжнародного гуманітарного університету. Серія : Економіка і менеджмент*. 2017. Вип. 27. Ч. 1. С. 50–54. URL : <http://www.vestnik-econom.mgu.od.ua/journal/2017/27-1-2017/13.pdf> (дата звернення : 15.09.2023).

28. Чукут С. А., Дмитренко В. І. Смарт-сіті чи електронне місто : сучасні підходи до розуміння впровадження Е-урядування на місцевому рівні. *Інвестиції : практика та досвід*. 2016. № 13. С. 89–93. URL : http://www.investplan.com.ua/pdf/13_2016/17.pdf (дата звернення : 02.10.2023).
29. Андрієнко А. О. Концепція «розумного міста»: уточнення ключових понять у контексті забезпечення розвитку великого муніципального утворення. *Аспекти публічного правління*. 2018. Т. 6. № 8. С. 24–34. URL : <https://aspects.org.ua/index.php/journal/article/view/432/432> (дата звернення : 15.09.2023).
30. Мужанова Т.М. «Розумне місто» як інноваційна модель управління. *Економіка. Менеджмент. Бізнес*. 2017. № 2(20). С. 116–122. URL : <http://journals.dut.edu.ua/index.php/emb/article/view/1515/1447> (дата звернення : 02.10.2023).
31. Севастьянов Р. В. Актуальні проблеми розвитку «Розумних міст» (SMART CITY). *Вісник Хмельницького національного університету*. 2021. № 2. С. 170–175. URL : <http://journals.khnu.km.ua/vestnik/wp-content/uploads/2021/08/2021-2-en-30.pdf> (дата звернення : 10.08.2023).
32. Що таке «Smart City» і як виглядає в українських реаліях? URL : <https://www.prostir.ua/?news=scho-take-smart-city-i-yak-vyhladyaje-v-ukrajinskyh-realiyah> (дата звернення : 10.09.2023).
33. Розумне місце майбутнього : 5 ключових технологій. URL : <https://futurenow.com.ua/rozumne-misto-majbutnogo-5-klyuchovyh-tehnologij/> (дата звернення : 02.10.2023).
34. Що потрібно знати про Smart City. URL : <https://maxnet.ua/blog/chto-nuzhno-znat-o-smart-city/> (дата звернення : 10.09.2023).
35. Розумні міста України. Що таке смарт-сіті і як це працює. URL : <https://www.bezpeka-shop.com.ua/blog/obzor/umnye-goroda-ukrainy-chto-takoe-smart-siti-i-kak-eto-rabotaet/> (дата звернення : 10.08.2023).
36. SMART CITY : технології «розумного міста» та їх цільове призначення. URL : <https://eukraine.org.ua/ua/news/smart-city-tehnologiyi-rozumnogo-mista-ta-yih-cilove-priznachennya> (дата звернення : 02.10.2023).
37. SMART CITY : розумні технології сучасного міста. URL : <https://hub.kyivstar.ua/news/smart-city-rozumni-tehnologiyi-suchasnogo-mista/> (дата звернення : 15.09.2023).
38. Левтеров О. А., Тютюник В. В., Калугін В. Д., Ольховіков С. В. Використання ефекту акустичної емісії для раннього виявлення загорання матеріалів, що містять целюлозу, об'єктові підсистеми універсальної системи моніторингу надзвичайних ситуацій в Україні. *Прикладна радіоелектроніка*. Харків : Харківський університет радіоелектроніки, 2017. Т. 16. № 1–2. С. 23–40. URL : <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/5938> (дата звернення : 02.10.2023).
39. Левтеров О. А., Тютюник В. В., Калугін В. Д. Методи ідентифікації процесу горіння целюлозомістких матеріалів на основі ефекту акустичної емісії. *Проблеми пожежної безпеки*. Харків : Національний університет цивільного захисту України, 2017. Вип. 42. С. 72–84. URL : <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/5939> (дата звернення : 02.10.2023).
40. Практичні аспекти реінжинірингу бізнес-процесів / О.Б. Данченко. Київ : Університет економіки та права «КРОК», 2017. 238 с. URL : https://library.krok.edu.ua/media/library/category/navchalni-posibniki/danchenco_0001.pdf (дата звернення : 10.08.2023).
41. Латишева О. В., Касьянюк С. В., Баранов Р. Р., Закіров Р. Р. Функціональне моделювання як інструментарій аналізу фінансового стану підприємств. *Управління економікою: теорія та практика*. Київ : Інститут економіки промисловості НАН України, 2019. С. 178–184. URL : <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/169765/13-Latysheva.pdf?sequence=1> (дата звернення : 02.10.2023).
42. Рубан І. В., Тютюник В. В., Тютюник О. О. Розвиток науково-технічних основ оперативного геоінформаційного акустичного моніторингу джерел терористичних небезпек. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. Київ : Національний університет оборони України ім. Івана Черняхівського, 2020. Вип. 3(39). С. 67–80. URL : <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/18114> (дата звернення : 02.10.2023).
43. Рубан І. В., Тютюник В. В., Тютюник О. О. Особливості створення системи підтримки прийняття антикризових рішень в умовах невизначеності вхідної інформації при надзвичайних ситуаціях. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. Київ : Національний університет оборони України ім. Івана Черняхівського, 2021. Вип. 1(40). С. 75–84. URL : <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/14232> (дата звернення : 02.10.2023).
44. Луценко В. І., Луценко І. В., Мазуренко О. В., Соболяк О. В. Характеристики акустичних полів наземних і малорозмірних повітряних об'єктів акустичної розвідки. *Прикладна радіоелектроніка*. Харків : Харківський університет радіоелектроніки, 2017. Т. 16. № 1, 2. С. 18–22. URL : https://nure.ua/wp-content/uploads/2018/Scientific_editions/are_3.pdf (дата звернення : 15.09.2023).
45. Дівізінюк М., Гончаренко Ю., Гончаренко Д. Про проблему розрахунку дальності прийому акустичної інформації з відкритих майданчиків. *Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні*. Київ : Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2012. № 1(23). С. 29–35. URL : https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/8616/1/23_p29.pdf (дата звернення : 10.08.2023).
46. Гончаренко Ю. Ю. Фізична модель знімання мовної інформації. *Системи обробки інформації*. Харків : Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, 2014. Вип. 7(123). С. 18–23. URL : https://www.hups.mil.gov.ua/periodic-app/article/11813/soi_2014_7_6.pdf (дата звернення : 10.08.2023).
47. Куценко В. В., Єрмаков Г. В., Телюков С. М., Демєнтиков Г. М. Оцінювання точності визначення місця розташування радіовипромінюючих цілей триангуляційним методом у рухливій системі пасивної радіолокації зенітних комплексів ближньої дії. Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. Харків : Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, 2010. Вип. 4(26). С. 77–82. URL : https://www.hups.mil.gov.ua/periodic-app/article/2739/zhups_2010_4_21.pdf (дата звернення : 15.09.2023).

REFERENCES

1. Levchuk, K.O., Romanyuk, R. Ya. Stalyy rozvytok mista yak klyuchovyy faktor rozvytku ekonomiky Ukrainy [Sustainable development of the city as a key factor in the development of the economy of Ukraine]. *Matematychnе modelyuvannya*. 2022. #1(46). pp. 131–140. Retrieved from <http://matmod.dstu.dp.ua/article/view/258455/255221>. [in Ukrainian].
2. Nazarenko, Yu., Syrbu, O. Stratehiya rozvytku mist: udoskonalennya pidkhodiv. Pryklad Kyveva [Urban Development Strategy: Improving Approaches. Example of Kyiv]. Retrieved from <https://cedos.org.ua/wp-content/uploads/stattya-strategiyi-rozvytku-mist.pdf>. [in Ukrainian].

3. Pin', A. M. Kontsepsiya rozvytku mista v konteksti rozvytku innovatsiynoho upravlinnya [The concept of city development in the context of the development of innovative management]. *Sotsial'no-ekonomichni problemy suchasnoho periodu Ukrainy*. 2018. #4(132). pp. 114–118. Retrieved from [http://ird.gov.ua/sep/sep20184\(132\)/sep20184\(132\)_114_PinA.pdf](http://ird.gov.ua/sep/sep20184(132)/sep20184(132)_114_PinA.pdf). [in Ukrainian].
4. Chul', O. M. Kontsepsiya rozbudovy mist v ramkakh rozvytku kreatyvnoyi ekonomiky: metodolohichnyy ta praktychnyy aspekt [The concept of urban development within the framework of the development of the creative economy: methodological and practical aspects]. *Elektronnyy zhurnal «Efektyvna ekonomika»*. Retrieved from: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=3348>. [in Ukrainian].
5. Zhyrak, R. M. Fenomen zhyttyestiykosti yak skladova rozvytku urboecosystem [The phenomenon of sustainability as a component of the development of urboecosystems]. *Suchasni problemy arkhitektury ta mistobuduvannya*. 2022. #64. P. 179–193. Retrieved from <http://archinform.knuba.edu.ua/article/view/267479/263335>. [in Ukrainian].
6. Planuvannya i zabudova terytoriy. DBN B.2.2-12:2018. Kyiv: Ministerstvo komunal'noho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunal'noho hospodarstva Ukrainy, 2018. 187 p. Retrieved from https://dbn.co.ua/pay/pub01/dbn-B-2212_planuvannya.pdf. [in Ukrainian].
7. Pro nacionaljnu bezpeku Ukrainy: Zakon Ukrainy vid 21 chervnja 2018 roku. #2469-VIII. Retrieved from <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2469-19>. [in Ukrainian].
8. Pro zasady vnutrishn'oyi i zovnishn'oyi polityky: Zakon Ukrainy vid 01 lyunya 2010 roku. #2411-VI. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2411-17#Text>. [in Ukrainian].
9. Pro pravovyy rezhym nadzvychaynoho stanu: Zakon Ukrainy vid 16 bereznja 2000 roku. #1550-III. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-14#Text>. [in Ukrainian].
10. Pro pravovyy rezhym voyennoho stanu: Zakon Ukrainy vid 12 travnja 2015 roku. #389-VIII. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/389-19#Text>. [in Ukrainian].
11. Ukaz Prezidenta Ukrainy Pro rishennja Rady natsional'noyi bezpeky i oborony Ukrainy vid 14 veresnja 2020 roku «Pro Stratehiyu natsional'noyi bezpeky Ukrainy». Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/392/2020#Text>. [in Ukrainian].
12. Andronov, V. A., Diviziniuk, M. M., Kalugin, V. D., & Tiutiunyk, V. V. (2016). Naukovo-konstruktorski osnovy stvorennia kompleksnoi systemy monitoryngu nadzvychaynykh sytuatsii v Ukraini [Scientific and design foundations of the creation of a comprehensive emergency monitoring system in Ukraine]. *Kharkiv. Natsionalnyi universytet tsyvilnoho zakhystu Ukrainy*. Retrieved from <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/5970>. [in Ukrainian].
13. Tiutiunyk, V. V., Tiutiunyk, O. O., Udyans'kyi, M. M., Yashchenko, O. A. Klasteryzatsiya rehioniv Ukrainy za rivnem nebezpeky ta shlyakhy pidvyshchennja efektyvnosti funktsionuvannya yedynoyi derzhavnoyi systemy tsyvil'noho zakhystu v umovakh nevyznachenosti vkhidnoyi informatsiyi pro vynyknennja nadzvychaynykh sytuatsiy [Clustering of regions of Ukraine according to the level of danger and ways to increase the efficiency of the operation of the unified state system of civil protection in conditions of uncertainty of incoming information about the occurrence of emergency situations]. *Naukovyy visnyk: Tsyvil'nyy zakhyst ta pozhezhna bezpeka*. 2021. #1(11). pp. 75–84. Retrieved from <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/14237>. [in Ukrainian].
14. Rishennja Rady natsional'noyi bezpeky i oborony Ukrainy vid 04 chervnja 2021 roku «Shchodo udoskonalennja merezhi sytuatsiynykh tsentriv ta tsyfrovoyi transformatsiyi sfery natsional'noyi bezpeky i oborony». Vvedeno v dyu Ukazom Prezidenta Ukrainy vid 18 chervnja 2021 roku. #260/2021. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0039525-21#Text>. [in Ukrainian].
15. Tiutiunyk, V. V., Kalugin, V. D., Pyslakova, O. O. Osnovopolozhni pryntsypy stvorennja u yedyniy derzhavniy systemi tsyvil'noho zakhystu informatsiyno-analitychnoyi pidsystemy upravlinnya protsesamy poperedzhennja y lokalizatsiyi naslidkiv nadzvychaynykh sytuatsiy [The fundamental principles of creating an information and analytical subsystem of management of the processes of prevention and localization of the consequences of emergency situations in the unified state system of civil protection]. *Systemy upravlinnya, navihatsiyi ta zv'yazku. Poltava. Poltavskyy natsional'nyy tekhnichnyy universytet imeni Yuriya Kondratyuka*. 2018. #4(50). pp. 168–177. Retrieved from <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/7411>. [in Ukrainian].
16. Tiutiunyk V. V., Kalugin V. D., Pyslakova O. O. Upravlins'ki osnovy stvorennja u yedyniy derzhavniy systemi tsyvil'noho zakhystu informatsiyno-analitychnoyi pidsystemy upravlinnya protsesamy poperedzhennja y lokalizatsiyi naslidkiv nadzvychaynykh sytuatsiy [Administrative bases for the creation of an information and analytical subsystem of the management of the processes of prevention and localization of the consequences of emergency situations in the unified state system of civil protection]. *Visnyk Natsional'noho universytetu tsyvil'noho zakhystu Ukrainy. Seriya «Derzhavne upravlinnya»*. Kharkiv: Natsional'nyy universytet tsyvil'noho zakhystu Ukrainy. 2020. #1(12). pp. 546–571. Retrieved from <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/11625>. [in Ukrainian].
17. Kodeks tsyvilnoho zakhystu Ukrainy vid 2 zhovtnia 2012 roku. #5403-VI. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text>. [in Ukrainian].
18. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 9 sichnia 2014 roku. #11 «Pro zatverdzhennia Polozhennia pro Yedynu derzhavnu systemu tsyvilnoho zakhystu». Retrieved from <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/11-2014-%D0%BF>. [in Ukrainian].
19. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 11 bereznja 2015 roku. #101 «Pro zatverdzhennia typovykh polozhen' pro funktsional'nu i terytorial'nu pidsystemy yedynoyi derzhavnoyi systemy tsyvil'noho zakhystu». Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/101-2015-%D0%BF#Text>. [in Ukrainian].

20. Rozporyadzhennya Kabinetu Ministriv Ukrayiny vid 25 sichnya 2017 roku #61-r. «Pro skhvalennya Stratehiyi reformuvannya systemy Derzhavnoyi sluzhby Ukrayiny z nadzvychaynykh sytuatsiy». Retrieved from: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/61-2017-%D1%80>. [in Ukrainian].
21. Kulyeshov, M. M., Sadkovyy, V. P., Tiutiunyk, V. V. (2020) Derzhavna systema tsyvil'noho zakhystu [State system of civil protection]. Kharkiv: Drukarnya Madryd. Retrieved from <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/11264> [in Ukrainian]
22. Kalugin, V. D., Tiutiunyk, V. V., Chernogor, L. F., Shevchenko, R. I. Rozrobka naukovykh osnov dlya stvorenniya sy'stemy monitoryngu, poperedzhennya ta likvidatsiyi nadzvychajnykh sy'tuacij pry'rodnogo ta tehnogennoho xarakteru ta zabezpechennya ekologichnoyi bezpeky' [Development of scientific and technical foundations for the creation of a system of monitoring, prevention and liquidation of emergency situations of a natural and man-made nature and ensuring environmental safety]. Sy'stemy obrobky informatsiyi. Xarkiv, Publishing centre «Xarkivs'kyj universytet Povitryanyx Sy'l imeni Ivana Kozheduba». 2013, #9 (116), P. 204–216. Retrieved from <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/2790>. [in Ukrainian].
23. Tiutiunyk, V. V., Kalugin, V. D., Pysklakova, O. O. Otsinka umov stvorenniya u yedyniy derzhavniy systemi tsyvil'noho zakhystu informatsiyno-analitychnoyi pidsystemy upravlinnya protsesamy poperedzhennya y lokalizatsiyi naslidkiv nadzvychaynykh sytuatsiy na osnovi analizu dynamiky proyavu nebezpek na terytoriyi Ukrayiny [Assessment of the conditions for the creation of an information and analytical subsystem in the unified state system of civil protection for the management of the processes of prevention and localization of the consequences of emergency situations based on the analysis of the dynamics of the manifestation of dangers on the territory of Ukraine]. Komunal'ne hospodarstvo mist. Seriya «Tekhnichni nauky ta arkhitektura». Kharkiv. Kharkivs'kyi natsional'nyy universytet mis'koho hospodarstva imeni O. M. Beketova. 2019. #1(147). pp. 66–82. Retrieved from <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/10272>. [in Ukrainian].
24. Tiutiunyk, V. V., Yashchenko, O. A., Ruban, I. V., Tiutiunyk, O. O. Osoblyvosti funktsionuvannya systemy sytuatsiynykh tsentriv na riznykh stadiyakh rozvytku nadzvychaynykh sytuatsiy [Peculiarities of the functioning of the system of situational centers at different stages of the development of emergency situations]. Suchasni informatsiyni tekhnolohiyi u sferi bezpeky ta oborony. Kyiv. Natsional'nyy universytet oborony Ukrayiny imeni Ivana Chernyakhovskoho. 2022. #1(43). pp. 41–52. Retrieved from <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/15894>. [in Ukrainian].
25. Tsentr Razumkova (2021) SMART-infrastruktura u stalomu rozvytku mist: svitovyy dosvid ta perspektyvy Ukrayiny [SMART infrastructure in the sustainable development of cities: world experience and prospects of Ukraine]. Kyiv. Vydavnytstvo «Zapovit». Retrieved from <https://razumkov.org.ua/uploads/other/2021-SMART-%D0%A1YTI-SITE.pdf> [in Ukrainian]
26. Smart Citi Ukraine: shcho tse ta yak tse pratsyuye v ukraïns'kykh realiyakh [Smart Citi Ukraine: what it is and how it works in Ukrainian realities]. Retrieved from <https://visitukraine.today/uk/blog/2183/smart-city-ukraine-shho-ce-ta-yak-ce-pracyuye-v-ukraïnskix-realiyax>. [in Ukrainian].
27. Kasych, A. O., Fedoryak, R. M., Sobyana, A. P. Innovatsiyni tekhnolohiyi «SMART CITY» yak mekhanizm pokrashchennya rivnya zhyttia v suchasnomu misti [Innovative technology «SMART CITY» as a mechanism for improving the standard of living in a modern city]. Mizhnarodnoho humanitarnoho universytetu. Seriya: Ekonomika i menedzhment. 2017. #27. Ch.1. pp. 50–54. Retrieved from <http://www.vestnik-econom.mgu.od.ua/journal/2017/27-1-2017/13.pdf> [in Ukrainian].
28. Chukut, S. A., Dmytrenko, V. I. Smart-siti chy elektronne misto: suchasni pidkhody do rozuminnya vprovadzhennya E-uryaduvannya na mistsevomu rivni [Smart city or electronic city: modern approaches to understanding the implementation of E-government at the local level]. Investytsiyi: praktyka ta dosvid. 2016. #13. pp. 89–93. Retrieved from http://www.investplan.com.ua/pdf/13_2016/17.pdf [in Ukrainian].
29. Andriyenko, A. O. Kontseptsiya «rozumnoho mista»: utochnennya klyuchovykh ponyat'u konteksti zabezpechennya rozvytku velykoho munitsypal'noho utvorenniya [The concept of a «smart city»: clarification of key concepts in the context of ensuring the development of a large municipal entity]. Aspekty publichnogo pravlinnya. 2018. v.6. #8. pp. 24–34. Retrieved from <https://aspects.org.ua/index.php/journal/article/view/432/432> [in Ukrainian].
30. Muzhanova, T. M. «Rozumne misto» yak innovatsiyni model' upravlinnya [«Smart city» as an innovative management model]. Ekonomika. Menedzhment. Biznes. 2017. #2(20). pp. 116–122. Retrieved from <http://journals.dut.edu.ua/index.php/emb/article/view/1515/1447>. [in Ukrainian].
31. Sevast'yanov R.V. Aktual'ni problemy rozvytku «Rozumnykh mist» (SMART CITY) [Actual problems of the development of «Smart Cities»]. Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu. 2021. #2. pp. 170–175. Retrieved from <http://journals.khnu.km.ua/vestnik/wp-content/uploads/2021/08/2021-2-en-30.pdf> [in Ukrainian].
32. Shcho take «Smart City» i yak vyhlyadaye v ukraïns'kykh realiyakh? [What is «Smart City» and what does it look like in Ukrainian realities?] Retrieved from <https://www.prostir.ua/?news=scho-take-smart-city-i-yak-vyhlyadaye-v-ukraïnskykh-realiyah> [in Ukrainian]
33. Rozumne mistse maybutn'oho: 5 klyuchovykh tekhnolohiy [The smart place of the future: 5 key technologies]. Retrieved from <https://futurenow.com.ua/rozumne-misto-majbutnogo-5-klyuchovykh-tehnologij/> [in Ukrainian]
34. Shcho potribno znaty pro Smart City [What you need to know about Smart City]. Retrieved from <https://maxnet.ua/blog/chto-nuzhno-znat-o-smart-city/> [in Ukrainian].
35. Rozumni mista Ukrayiny. Shcho take smart-siti i yak tse pratsyuye [Smart cities of Ukraine. What is a smart city and how does it work]. Retrieved from <https://www.bezpeka-shop.com.ua/blog/obzor/umnye-goroda-ukrainy-chto-takoe-smart-siti-i-kak-eto-rabotaet/> [in Ukrainian].

36. SMART CITY: tekhnolohiyi «rozumnoho mista» ta yikh tsil'ove pryznachennya [SMART CITY: «smart city» technologies and their purpose]. Retrieved from <https://eukraine.org.ua/ua/news/smart-city-tehnolohiyi-rozumno-go-mista-ta-yih-cilove-pryznachennya> [in Ukrainian]
37. SMART CITY: rozumni tekhnolohiyi suchasnoho mista [SMART CITY: smart technologies of the modern city]. Retrieved from <https://hub.kyivstar.ua/news/smart-city-rozumni-tehnolohiyi-suchasno-go-mista/> [in Ukrainian].
38. Levterov, A., Tiutiunyk, V. V., Kalugin, V. D., Ol'khovkov S. V. Yspol'zovanye effekta akusticheskoy emyssey pry rannem obnaruzhenyy vozhoranyya tsellyulozoderzhashchykh materyalov ob'ektovoy podsystemoy unyversal'noy systemy monytorynha chrezvychaynykh sytuatsyy v Ukrayne [The use of the effect of acoustic emission for the early detection of ignition of materials containing cellulose, the object subsystem of the universal emergency monitoring system in Ukraine]. *Prykladnaya radyoelektronika*. Kharkiv. Kharkivs'kyi universytet radioelektroniky. 2017. v.16. #1–2. pp. 23–40. Retrieved from <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/5938> [in Ukrainian].
39. Levterov A. A., Tiutiunyk V. V., Kalugin V. D. Metody ydentyfikatsyy protsesa horennya tsellyulozoderzhashchykh materyalov na osnove effekta akusticheskoy emyssey [Methods of identification of the process of combustion of cellulose-containing materials based on the effect of acoustic emission]. *Problemy pozharnoy bezopasnosti*. 2017. #42. pp. 72–84. Retrieved from <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/5939> [in Ukrainian]
40. Danchenko, O. B. (2017) *Praktychni aspekty reinzhynirynhu biznes-protsesiv* [Practical aspects of business process reengineering]. Kyiv: Universytet ekonomiky ta prava «KROK». Retrieved from: https://library.krok.edu.ua/media/library/category/navchalni-posibniki/danchenco_0001.pdf [in Ukrainian].
41. Latysheva, O. V., Kas'yanyuk, S. V., Baranov, R. R., Zakirov, R. R. Funktsional'ne modelyuvannya yak instrumentariy analizu finansovoho stanu pidpryemstv [Functional modeling as a tool for analyzing the financial state of enterprises]. *Upravlinnya ekonomikoyu: teoriya ta praktyka*. Kyiv. Instytut ekonomiky promyslovosti NAN Ukrayiny. 2019. pp. 178–184. Retrieved from <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/169765/13-Latysheva.pdf?sequence=1> [in Ukrainian].
42. Ruban, I. V., Tiutiunyk, V. V., Tiutiunyk, O. O. Rozvytok naukovo-tekhnichnykh osnov operatyvnoho heoinformatsynoho akustychnoho monitorynha dzherel terorystychnykh nebezpek [Development of scientific and technical foundations of operational geo-informational acoustic monitoring of sources of terrorist dangers]. *Suchasni informatsiyi tekhnolohiyi u sferi bezpeky ta oborony*. Kyiv: Natsional'nyy universytet oborony Ukrayiny imeni Ivana Chernyakhovs'koho. 2020. #3(39). pp. 67–80. Retrieved from <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/18114> [in Ukrainian].
43. Ruban, I. V., Tiutiunyk, V. V., Tiutiunyk, O. O. Osoblyvosti stvorenniya systemy pidtrymky pryynattya antykryzovykh rishen'v umovakh nevyznachenosti vkhidnoyi informatsiyi pry nadzvychaynykh sytuatsiyakh [Peculiarities of creating a support system for making anti-crisis decisions in conditions of uncertainty of input information in emergency situations]. *Suchasni informatsiyi tekhnolohiyi u sferi bezpeky ta oborony*. Kyiv: Natsional'nyy universytet oborony Ukrayiny imeni Ivana Chernyakhovs'koho. 2021. #1(40). pp. 75–84. Retrieved from: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/14232> [in Ukrainian].
44. Lutsenko, V. Y., Lutsenko, Y. V., Mazurenko, A. V., Sobolyak, A. V. Kharakterystyky akusticheskyykh poley nazemnykh y malorazmernykh vozdushnykh obektiv akusticheskoy razvedky [Characteristics of acoustic fields of ground and small-sized aerial objects of acoustic reconnaissance]. *Prykladnaya radyoelektronika*. Kharkiv. Kharkivs'kyi universytet radioelektroniky. 2017. v.16. #1,2. pp.18–22. Retrieved from https://nure.ua/wp-content/uploads/2018/Scientific_editions/are_3.pdf [in Ukrainian].
45. Dyvyzynyuk, M., Honcharenko, Yu., Honcharenko, D. O probleme rascheta dal'nosti pryema akusticheskoy ynformatsyy s otkrytykh ploschadok [About the problem of calculating the range of reception of acoustic information from open areas]. *Pravove, normatyvne ta metrolohichne zabezpechennya systemy zakhystu informatsiyi v Ukrayini*. Kyiv. Natsional'nyy tekhnichnyy universytet Ukrayiny «Kyyivs'kyi politekhnichnyy instytut imeni Ihorya Sikors'koho», 2012. #1(23). pp. 29–35. Retrieved from https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/8616/1/23_p29.pdf [in Ukrainian].
46. Honcharenko, Yu. Yu. Fyzycheskaya model's'ema rechevoy ynformatsyy [Physical model of language information capture]. *Systemy obrobky informatsiyi*. Kharkiv. Kharkivs'kyi universytet Povitryanykh Syl imeni Ivana Kozheduba. 2014. #7(123). pp. 18–23. Retrieved from https://www.hups.mil.gov.ua/periodic-app/article/11813/soi_2014_7_6.pdf [in Ukrainian].
47. Kutsenko V.V., Ermakov H.V., Telyukov S.N., Dementyyuk H.M. Otsenyvanye tochnosti opredeleniya mestopolozheniya radyoyzluchayushchykh tseley tryanhulyatsyonnyim metodom v podvyzhnoy systeme passivnoy radyolokatsyy zenytnykh kompleksov blyzhneho deystviya [Evaluation of the accuracy of determining the location of radio-emitting targets by the triangulation method in the mobile passive radar system of short-range anti-aircraft systems]. *Zbirnyk naukovykh prats' Kharkivs'koho universytetu Povitryanykh Syl*. Kharkiv. Kharkivs'kyi universytet Povitryanykh Syl imeni Ivana Kozheduba. 2010. #4(26). pp. 77–82. Retrieved from https://www.hups.mil.gov.ua/periodic-app/article/2739/zhups_2010_4_21.pdf [in Ukrainian].

FEATURES OF CREATING A SYSTEM OF ACOUSTIC MONITORING OF EMERGENCY SOURCES IN THE CONTEXT OF THE DEVELOPMENT OF THE SMART CITY CONCEPT

V. Tiutiunyk¹, O. Tiutiunyk², D. Usachov¹

¹*National University of Civil Defence of Ukraine, Ukraine*

²*Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Ukraine*

KEYWORDS:

ANNOTATION

SMART CITY, Safe city, emergency situation, life safety of the city, system of acoustic monitoring of emergency situations, control of the acoustic space of the city, spectral analysis, passive location of sources of danger, system of situational centers, management anti-crisis decision-making.

The basic principles of creating in the SAFE CITY model of the SMART CITY system a subsystem for controlling the city's acoustic space are outlined, followed by the receipt and processing of information, as well as forecasting the occurrence of emergency situations of various types in the city and developing effective management anti-crisis solutions. A structural and functional model of strategic development in the general system SMART CITY of the subsystem SAFE CITY was developed (according to the IDEF0 standard), taking into account the governing flows of the regulatory and legal framework of Ukraine and the availability of relevant mechanisms (resources) in the state. In the process of modeling, it is shown that the process of registering threats to the life of the city includes the organization of a financial audit, social and environmental monitoring, video surveillance, radiation, chemical and biological monitoring, as well as spectral analysis of radiation from sources of danger. At the same time, it was established that the organization of the spectral analysis of radiation from sources of danger includes a complex analysis of the characteristics of radiation in various frequency ranges (in the acoustic, radio, infrared, optical, ultraviolet, and X-ray ranges, as well as the analysis of gamma and cosmic rays), where each of the methods analysis has both disadvantages and advantages. A systematic approach and principles of using the spectral analysis of the acoustic space of the city are proposed for the implementation of continuous and long-term operational monitoring on a real-time scale based on the place of occurrence and the dynamics of the development of identified sources of emergency situations of various nature. At the same time, it was established that the main indicator of the effectiveness of the operational acoustic monitoring subsystem of the emergency zone in the city is the reliability of the identification of the source of danger by type and place of occurrence, which depends on factors that directly characterize the dynamics of changes in indicators of the development of the source of danger, on factors that characterize tactical and technical indicators of means of acoustic space control, as well as from factors that are characterized by geographical and physical and chemical indicators of the place of origin of the source of danger and the medium of propagation of the informational acoustic signal. The system approach proposed for the creation of this subsystem and the principles of using the spectral analysis of the acoustic space of the city are the basis for further scientific research aimed at developing an effective system of ground-based automated devices for monitoring acoustic space and passive location of hazard sources.

УДК 614.841.45

НАТУРНІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКРАНУВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ СУЦІЛЬНИХ ВОДЯНИХ ЗАВІС ВІД ПРОНИКНЕННЯ ПОТОКУ ТЕПЛОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ТА ДИМУ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2.77-87>

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

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

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

Ілляченко П. О., ORCID iD 0000-0001-6687-6388

Коваленко В. В., ORCID iD 0000-0001-5780-5684

*E-mail: naanotek@ukr.net

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції:

02.10.2023

Пройшла рецензування:

12.10.2023

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

пожежа, протипожежний захист, суцільна, дренчерна та тонко розпилена водяна завіса, щільність теплового потоку випромінювання, оптична щільність диму, екранувальна здатність, технічні пристрої для створення водяних завіс.

АНОТАЦІЯ

Виконано аналітичні дослідження чинної української і зарубіжної нормативної документації та інших джерел доступної інформації щодо ефективності застосування водяних завіс із запобігання (зменшення) дії пожежі та її небезпечних факторів на людей, промислове обладнання, майно та конструкції будівель і споруд. Встановлено, що у чинних в Україні нормативних документах з питань застосування водяних завіс, що регламентують вимоги до необхідних параметрів завіс, немає вимог до показників їх екранувальної здатності від проникнення потоку теплового випромінювання та диму. Визначено інші проблемні питання та підтверджено актуальність подальших досліджень з їхнього вирішення. Попередньо проведено відповідні лабораторні розвідки з досліджень екранувальної здатності суцільних водяних завіс від проникнення потоку теплового випромінювання та диму, зокрема із застосуванням хімічних добавок до води, що покращують гідродинамічні характеристики водяного потоку. Розроблено та створено відповідне випробувальне обладнання для виконання натурних експериментальних досліджень з визначення показників екранування від проникнення потоку теплового випромінювання та диму крізь водяну завісу як суцільного водяного потоку, що спадає під тиском зі зливного пристрою зверху донизу. Проведено серію натурних експериментальних досліджень із захисту суцільною водяною завісою отвору у прорізі стіни будівельної конструкції від проникнення через нього потоку теплового випромінювання й диму. Наведено їхні результати, які використано під час розроблення Рекомендацій щодо застосування водяних завіс у системах протипожежного захисту в Україні. Надалі ці вказівки можуть застосовувати під час розроблення технічних вимог до систем для створення водяних завіс у складі нормативних та інших документів (ДСТУ, ДБН, технічних умов, конструкторської та проєктної документації тощо) для забезпечення пожежної безпеки на пожежонебезпечних об'єктах згідно з Правилами пожежної безпеки в Україні.

Постановка проблеми. У [1–2] розглянуто висвітлені у чинній в Україні нормативній документації та інших джерелах доступної інформації питання щодо запобігання (зменшення) дії небезпечних факторів пожежі на людей,

промислове обладнання, майно та конструкції будівель і споруд, зокрема за допомогою застосування водяних завіс. В аналітичних дослідженнях наведено отримані результати щодо ефективності водяних завіс з екранування від

негативних впливів потоків теплового випромінювання, диму та небезпечних газів як під час пожеж, так і під час локалізації та ліквідації інших газонебезпечних ситуацій та аварій. Окреслено актуальність і напрями, за якими планувалось проведення теоретичних та експериментальних розвідок із цього питання. Наведено матеріали отриманих результатів під час виконання лабораторних експериментальних досліджень водяних завіс щодо екранування від проникнення теплового випромінювання, диму та небезпечних газоподібних продуктів горіння, що утворюються у разі пожеж. Обґрунтовано актуальність та напрями, за якими необхідно провести, зокрема, натурні експериментальні дослідження із вказаного питання, а їх результати наведено у цій публікації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Чинні в Україні нормативні документи [3–5] регламентують вимоги до однієї із систем протипожежного захисту, а саме – водяних завіс, що призначені, зокрема, для запобігання поширенню полум'я і які можуть бути незалежними або доповнювати інші засоби протипожежного захисту. Стандарт [3] поширюється на зрошувачі для водяних завіс (окрім зрошувачів для тонко розпиленої води), призначених для розпилення води або водних розчинів з метою запобігання поширенню (блокуванню) пожежі всередині захищуваного приміщення, запобігання її поширенню через прорізи в огорожувальних конструкціях будинків і споруд та охолодження технологічного обладнання. Крім того, в ньому унормовано технічні вимоги до дренчерних водяних завіс для захисту від теплового випромінювання таких пожежонебезпечних об'єктів. Зокрема, це: посудини зі зрідженими горючими газами, що розташовані над землею; резервуари для зберігання горючих рідин під атмосферним тиском; будівельні конструкції – горизонтальні та вертикальні несучі сталеві елементи; вертикальні

поверхні будинків; кабельні проходки; трансформатори тощо. У стандарті [4] унормовано основні технічні вимоги до зрошувачів для водяних завіс. У ДБН [5], у частині забезпечення пожежної безпеки культурно-видовищних та дозвіллевих закладів, регламентуються вимоги до застосування систем водяного дренчерного пожежогасіння, зокрема для створення водяних завіс. У [6] висвітлено питання щодо застосування водних розчинів високомолекулярних полімерів для покращення гідродинамічних характеристик водяних завіс. У [7] наведено результати досліджень щодо екранувальної здатності розпилених водяних завіс для захисту сховищ рідкого палива, де стверджується, що досягнуто значення екранувальної здатності (50–75)%, та проводяться дослідження щодо підвищення цього показника вище 90%. У [8] наведено результати досліджень щодо екранувальної здатності суцільної водяної завіси від проникнення потужного теплового потоку як високотемпературного струменя горіння водню.

Таким чином, аналіз останніх наукових розвідок і публікацій із зазначеного питання показує, що роботи стосовно досліджень водяних завіс для застосування в системах протипожежного захисту на сьогодні тривають як в Україні, так і за кордоном, а зміст та результати підтверджують їхню актуальність.

Формулювання цілей дослідження. Метою статті є висвітлення отриманих в ІДУ НД ЦЗ результатів натурних експериментальних досліджень щодо ефективності екранування водяних завіс, зокрема суцільних водяних завіс як водяного потоку, що суцільно спадає під тиском зі зливного пристрою зверху донизу (далі – суцільна водяна завіса), від проникнення потоку теплового випромінювання та диму, що утворюється у разі пожежі.

Виклад основного матеріалу. Для проведення натурних експериментальних досліджень з визначення показника екранування від проникнення теплового

потоків випромінювання крізь суцільну водяну завісу на пожежно-виробувальному полігоні ІДУ НД ЦЗ створено випробувальний стенд на базі випробувального боксу ВБ-40 із прибудовою (далі – випробувальний бокс), загальний вигляд та внутрішні розміри якого та принципову схему випробувального стенда для натурних експериментальних досліджень з визначення показника екранування від проникнення теплового потоку випромінювання крізь суцільну водяну завісу наведено на рис. 1.

Випробувальний бокс поділений на два відсіки 1, 2 бетонною перегородкою з отвором 3 розмірами Д×В (2000×1300) мм, що захищається суцільною водяною завісою. На бетонній перегородці випробувального боксу над отвором 3 встановлено зливний пристрій для створення суцільної водяної завіси 4. Загальний вигляд зливного пристрою для створення суцільної водяної завіси 4 в роботі та розміри його поперечного перерізу наведено на рис. 2.

Окрім наведених розмірів, зливний пристрій створює суцільну водяну завісу довжиною 2000 мм та товщиною не менше 1 мм.

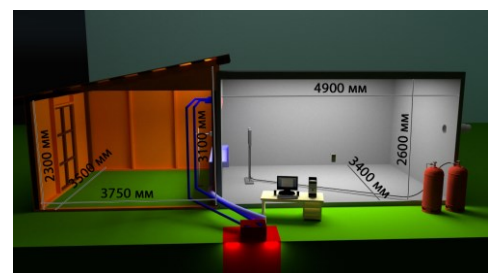
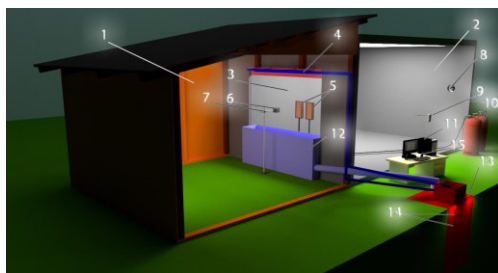
Для створення суцільної водяної завіси під час проведення натурних випробувань використовувався 0,06% водний розчин поліакриламід (далі – ПАА). Це високомолекулярна хімічна

сполука, що раніше (згідно з результатами лабораторних досліджень та наведена у [6] як протитурбулентна хімічна добавка до води) показала позитивний вплив на гідродинамічні характеристики водяної завіси, насамперед покращуючи суцільність та рівномірність спадаючого потоку.

ПАА – група полімерів на основі акриламідів та його похідних. Хімічна формула: $[-CH_2-CH(CONH_2)-]_n$. Під час проведення натурних експериментальних досліджень застосовувався ПАА серії ECOFLOC марки AR-3 (виробництво – Китай).

Живильні трубопроводи зливного пристрою 4 для створення суцільної водяної завіси були підключені паралельно до двох водяних насосів Optima V1500-QG 14, що одночасно працюють. Витрату води (розчину ПАА) вимірювали за допомогою лічильника типу СТВ-80 DN80, тиск перед зливним пристроєм вимірювали за допомогою манометра цифрового типу CPG1500-ST-Z-S-BG416GDSZ-13-W (на схемі умовно не показані).

Водопостачання стенда здійснювалось за кільцевою схемою: вода (розчин ПАА) з підземного резервуару 13 ємністю 1,25 м³ за допомогою двох насосів 14 подавалась до зливного пристрою 4, а після цього самотією поверталась назад у підземний резервуар 1.



1, 2 – відсіки випробувального боксу; 3 – отвір захищеного прорізу; 4 – зливний пристрій для створення водяної завіси; 5 – газові панелі інфрачервоного випромінювання; 6 – датчик приймача теплового випромінювання; 7 – термопара; 8 – вентилятор осьовий; 9 – манометр диференційний; 10 – балони з пропан-бутаном; 11 – персональний комп'ютер (ноутбук); 12 – збірник для води; 13 – підземний резервуар для води; 14 – водяні насоси; 15 – комунікаційний модуль типу ADAM-4118

Рисунок 1 – Загальний вигляд та внутрішні розміри випробувального боксу і принципова схема випробувального стенда для натурних експериментальних досліджень з визначення показника екранування від проникнення теплового потоку випромінювання крізь суцільну водяну завісу

Джерело: розробка авторів

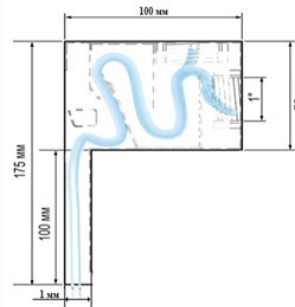


Рисунок 2 – Загальний вигляд зливного пристрою для створення суцільної водяної завіси в роботі та розміри його поперечного перерізу

Джерело: розробка авторів

Як джерело теплового потоку випромінювання використовували дві газові панелі інфрачервоного (далі – ІЧ) випромінювання 5 типу B24 2SX (виробництво Франції), вигляд яких наведено на рис. 3, загальною тепловою потужністю близько 30 кВт, розміщені у відсіку 2 випробувального боксу напроти середини прорізу 3 на відстані до площини водяної завіси (100 ± 5) мм та на висоті їхньої середини від підлоги (1000 ± 5) мм. Для роботи панелей ІЧ випромінювання використовувалась пропан-бутанова газова суміш із двох балонів 10 місткістю 40 л. Необхідний тиск та витрата газу для роботи панелей ІЧ випромінювання забезпечувались відповідними газовими редукторами. Для підпалювання газу та контролю безпечних режимів роботи використовувались відповідні пристрої, якими оснащені газові ІЧ панелі 5. Панелі 5 після виходу на робочий режим мали стабільні значення теплового потоку та температури.



Рисунок 3 – Загальний вигляд газових панелей інфрачервоного випромінювання

У відсіку 1 випробувального боксу, напроти середини отвору 3, на відстані (100 ± 5) мм від площини водяної завіси та на висоті від підлоги (1000 ± 5) мм, встановлювали датчик приймача теплового випромінювання 6. Одну термопару (тип ТХА) 7 розміщено безпосередньо перед панеллю ІЧ випромінювання 5, другу – над датчиком приймача теплового випромінювання 6 (в одній вертикальній площині).

У відсіку 2 випробувального боксу, на задній стіні, встановлено осьовий вентилятор типу Binetti FDP-1258 із продуктивністю $284 \text{ м}^3/\text{год}$, що призначений для створення надлишкового тиску всередині відсіку 2 під час роботи водяної завіси.

Для вимірювання надлишкового тиску у відсіку 2 передбачено манометр диференційний 9 типу ОВЕН ПД200-ДД 0,007-155-0,1-2-Н.

Методи досліджень: під час проведення натурних експериментальних досліджень застосовувався метод прямого вимірювання величини щільності потоку теплового випромінювання без застосування та із застосуванням водяної завіси.

За результатами раніше проведених лабораторних досліджень щодо визначення коефіцієнта екранувальної здатності водяної завіси встановлено найбільш ефективну товщину водяної завіси та робочий тиск для її створення у співвідношенні витрати води на значення коефіцієнта екранувальної здатності.

Натурні експериментальні дослідження проводились за робочого тиску води перед зливним пристроєм завіси ($0,20 \pm 0,02$) бар, під час якого забезпечувалась витрата води (розчину ПАА) зі зливного пристрою не менше 5,3 л/с та товщина водяної завіси не менше 1 мм. Водночас витрата води на один погонний метр довжини завіси складала – 2,65 л/с×пог.м

Показник (коефіцієнт) екранування від проникнення потоку теплового випромінювання крізь водяну завісу

$H_{т.в.}$ (%) визначався за формулою (1):

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

де: I_1 – щільність теплового потоку, виміряна без застосування завіси, кВт/м²;

I_2 – щільність теплового потоку, виміряна за суцільною водяною завісою, кВт/м²

Засоби вимірювальної техніки (далі – ЗВТ), що використовувались під час проведення натурних експериментальних досліджень, надані в табл. 1.

Таблиця 1 – Засоби вимірювальної техніки, що використовувались під час проведення натурних експериментальних досліджень

Найменування ЗВТ	Діапазон вимірювань	Клас точності або похибка вимірювання
Гігрометр Testo 608 – H1	(від 0 до 50)°C; (від 2 до 98)%	$\Delta = \pm 0,5$ °C, $\Delta = \pm 3$ %
Барометр-анероїд М-67	від 600 до 800) мм рт.ст.	$\Delta = \pm 1$ мм рт. ст.
Рулетка Stanley	(від 0 до 60) м	2 клас точності
Секундомір СОС пр. 2Б-2-000	(від 0 до 60 та більше) с	2 клас точності; U = 2,26 с
Приймач теплового випромінювання РАП-12М.2	(від 0,001 до 20,000) кВт/м ² ; (від 0,001 до 75,000) кВт/м ²	$\Delta = \pm 6$ % $\Delta = \pm 3$ %
Лічильник води СТБ-80 DN80	(від 0 до 50) м ³ /год	U = 0,25%, $\Delta = \pm 1,69$ %
Цифровий манометр СРГ1500	(від 0 до 1600) кПа	U = 0,34%, $\Delta = \pm 0,05$ %
Термоанемометр AR866A	(від 1 до 30) м/с	U = м/с, $\Delta = \pm 0,1$ м/с
Манометр диференційний ОВЕН ПД200-ДД 0,007-155-0,1-2-Н	(від 0 до 7,0) кПа	$\Delta = \pm 0,1$ %
Циліндр мірний 1-2000	(від 160 до 2000) см ³	$\Delta = \pm 20$ см ³
Модуль аналогового вводу сигналу ADAM-4018	4...20 мА, -20...+20 мА; J: 0...+750 °C, T: -100...+400°C, K: 0...+1200°C, R: +500...+1750°C, E: 0...+1000°C, S: +500...+1750°C, B: +500...+1800°C	$\Delta = \pm 0,2$ %
Датчик чистоти повітря PMS5003	(від 1 до 10) мкм	$\Delta = \pm 2,0$ %
Лабораторний блок живлення KPS3010D	(від 0 до 30) В, (від 0 до 10) А	$\Delta = \pm 1$ % $\Delta = \pm 1$ %

Хід та результати досліджень:
Газові панелі інфрачервоного випромінювання 5 та датчик приймача потоку теплового випромінювання 6 розміщували на мінімально безпечних відстанях щодо водяної завіси з метою забезпечення максимального значення теплового потоку, не допускаючи потрапляння на них крапель води від завіси. Вмикали газові панелі 5 та розігрівали їхні стільникові керамічні нагрівачі. Після видимого досягнення стабілізації значень щільності потоку

теплового випромінювання за показами приймача теплового випромінювання 6 та температури за показами термодатчиків 7 (на екрані комп'ютера) фіксували ці значення без вмикання водяної завіси. Потім вмикали водяну завісу та вентилятор 8 для створення надлишкового тиску у відсіку 2. Фіксували значення щільності потоку теплового випромінювання за водяною завісою, не змінюючи попередніх робочих параметрів стенда.

Дослідження проводились за трьома дослідними. На рис. 4 наведено графіки

зміни середньоарифметичних значень показників трьох послідовних дослідів: потоку теплового випромінювання (без та

з водяною завісою), температури перед і за завісою та надлишкового тиску у відсіку 2 (перед завісою) у часі.

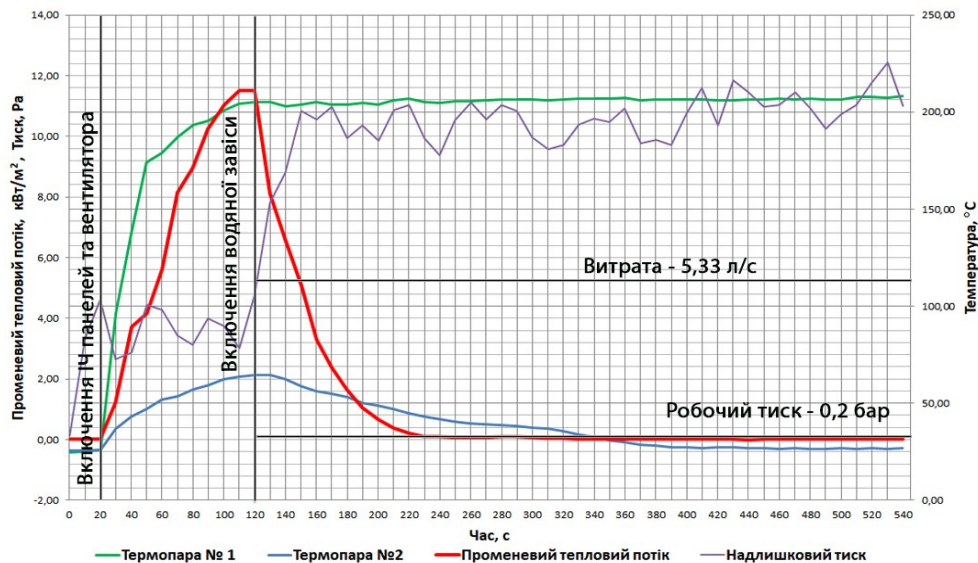


Рисунок 4 – Графіки зміни середньоарифметичних значень потоку теплового випромінювання (без та з водяною завісою), температури (перед та за завісою) та надлишкового тиску у відсіку 2 (перед завісою) у часі у разі роботи суцільної водяної завіси для проведених трьох дослідів

Джерело: розробка авторів

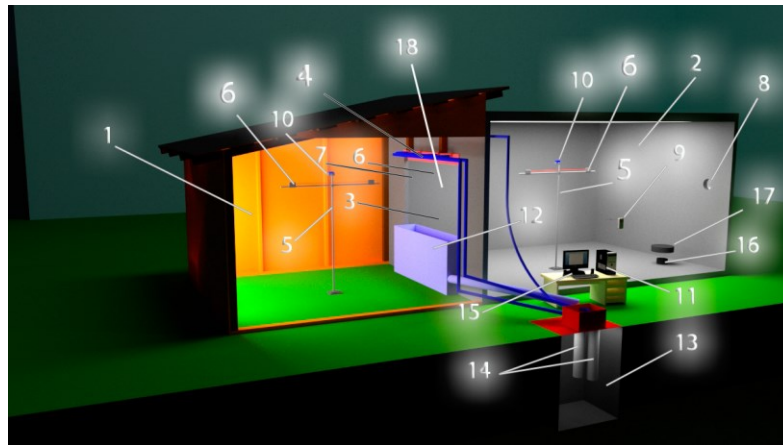
Проведення натурних експериментальних досліджень з визначення показника екранування від проникнення диму крізь суцільну водяну завісу виконувалось у випробувальному боксі, загальний вигляд якого та принципова схема стенда для натурних експериментальних досліджень з визначення показника екранування від проникнення диму крізь суцільну водяну завісу наведені на рис. 5. Внутрішні розміри випробувального боксу наведені на рис. 1. Загальний вигляд зливного пристрою для створення суцільної водяної завіси в роботі та розміри його поперечного розрізу наведено на рис. 2.

Створення суцільної водяної завіси здійснювалось аналогічно наведеному вище під час проведення натурних експериментальних досліджень з визначення показника екранування від

проникнення теплового потоку крізь суцільну водяну завісу.

Для герметизації прорізу 3 перед проведенням досліджень використовувалась заслінка 18, виконана як металевий каркас, на який була наклеєна поліетиленова плівка. У відсіках 1 та 2 випробувального боксу, напроти середини отвору 3, на відстані $(1,0 \pm 0,5)$ м від водяної завіси та на висоті $(1,0 \pm 0,5)$ від підлоги, встановлювали комплекси для вимірювання оптичної щільності задимленого середовища (диму).

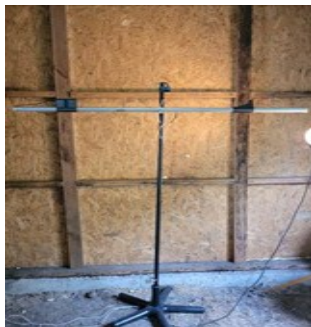
Комплекс для вимірювання оптичної щільності задимленого середовища (диму) функціонує за принципом вимірювання величини лінійного пропущеного інфрачервоного світла. Загальний вигляд комплексу та його принципова блок-схема наведені на рис. 6.



1, 2 – відсіки випробувального боксу; 3 – отвір-проріз, що захищається; 4 – зливний пристрій для створення суцільної водяної завіси; 5 – стійка; 6 – комплекс для вимірювання оптичної щільності задимленого середовища (диму); 7 – суцільна водяна завіса; 8 – вентилятор осьовий; 9 – манометр диференційний; 10 – детектор аерозолів твердих частинок; 11 – персональний комп’ютер (ноутбук); 12 – збірник для води; 13 – підземний резервуар для води; 14 – водяні насоси; 15 – комунікаційний модуль ADAM-4118; 16 – модельне вогнище для створення диму; 17 – кришка модельного вогнища; 18 – заслінка

Рисунок 5 – Загальний вигляд випробувального боксу та принципова схема стенда для натурних експериментальних досліджень з визначення показника екранування від проникнення диму крізь суцільну водяну завісу

Джерело: розробка авторів



а)



б)

1 – лазерний діод модульний; 2 – фоторезистор; 3 – джерело електроживлення; 4 – вимикач; 5 – вимірювальний блок на базі модуля ADAM з ноутбуком; 6 – стійка

Рисунок 6 – Загальний вигляд комплексу для вимірювання оптичної щільності диму (а); блок-схема принципова (б)

Джерело: розробка авторів

Загалом комплекс складається з: лазерного діода модульного 1, фоторезистора 2, джерела електроживлення 3, вимикача 4, вимірювального блока на базі модуля ADAM з ноутбуком 5, стійки 6. Лазерний діод 1 та фоторезистор 2 розміщені співосно один до одного на поперечині стійки 6.

Принцип роботи комплексу полягає у здатності фоторезистора змінювати електричний опір залежно від величини світлового потоку лазерного променя, внаслідок чого змінюється сила струму в

електричному колі, що фіксується вимірювальним блоком 5 і відображається на екрані ноутбука.

Комплекс має таку світлову (люкс-амперну) характеристику:

- у разі відкритого фоторезистора у чистому середовищі – до 20 мА;
- у разі закритого фоторезистора у чистому середовищі – 0 мА.

Методи досліджень: під час проведення натурних експериментальних досліджень застосовувався метод непрямого вимірювання щільності

задимленого середовища у відсіку 1 випробувального боксу, яка може бути більшою від прозорості чистого повітря у разі проникнення диму із відсіку 2 крізь суцільну водяну завісу в міліамперах з подальшим перерахунком в одну із загальноприйнятих одиниць оптичної щільності повітряного (задимленого) середовища – децибелі за формулою (2):

$$D = 20 \lg I_i/I_0, \text{ дБ} \quad (2)$$

де I_i – величина струму, що зафіксована комплексом у задимленому

середовищі, мА;

I_0 – величина струму, що зафіксована комплексом у незадимленому середовищі, мА.

У табл. 2 наведені окремі співвідношення значень сили струму в міліамперах (мА) до величини оптичної щільності диму в децибелах (дБ), що отримані за формулою (2), які, зокрема, використовувались під час калібрування комплексу.

Таблиця 2 – Окремі співвідношення значень сили струму в міліамперах (мА) до величини оптичної щільності диму в децибелах (дБ)

Д, дБ	0	-0,01	-0,1	-1	-2	-3	-6	-10	-20
I_i/I_0	1,000	0,999	0,989	0,891	0,794	0,708	0,501	0,316	0,100

Комплекс відкалібровано для вимірювань оптичної щільності диму в децибелах для діапазону (0–2) дБ за допомогою оптичних атенуаторів (фільтрів), якими комплектуються димові сповіщувачі АРТОН [9].

Для визначення масової частки дрібних твердих частинок аерозолі (диму) в об'ємі з розмірами від 10^{-7} м до 10^{-5} м використовувались два датчики 10 чистоти

повітря PMS5003, які були закріплені на стійках 5. Для реєстрації значень зміни масової частки аерозолі в об'ємі відсіків 1 та 2 випробувального боксу використовувалися дві плати Arduino Uno CH340 на базі мікроконтролера ATmega328p, загальний вигляд яких наведено на рис. 7. Отримані результати у цій публікації не наведені.



Рисунок 7 – Загальний вигляд комплексу для визначення масової частки дрібних твердих частинок аерозолі (диму) в об'ємі відсіків 1 та 2 випробувального боксу

Джерело: розробка авторів

Показник (коефіцієнт) екранування проникнення диму крізь суцільну водяну завісу H_d (%) визначався за формулою (3):

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

де: D_1 – оптична щільність диму у відсіку 1, що проникає через отвір прорізу в перегородці, якщо водяна завіса не працює, дБ;

D_i – оптична щільність диму у відсіку 1, що проникає через отвір прорізу в перегородці, якщо водяна завіса працює, дБ.

Хід та результати досліджень: Вмикали в роботу всю вимірювальну апаратуру. Модельне вогнище для створення диму 16 заповнювали деревною тирсою, змоченою сумішшю бензину А-92 з машинною оливою. Отвір 3 прорізу, що

захищався, щільно закривали заслінкою 10, проблемні місця з негерметичності попередньо ущільнювали монтажною піною, вмикали водяну завісу для додаткової герметизації прорізу. Підпалювали суміш у модельному вогнищі 16 та розпочинали заповнення відсіку 2 випробувального боксу димом. Під час досягнення показів комплексу для вимірювання оптичної щільності задимленого середовища ($5,0 \pm 0,1$) МА подавання диму закінчували, накриваючи модельне вогнище 16 кришкою 17. Давали витримку протягом від 2 хв до 3 хв для того, щоб дим рівномірно розподілився в об'ємі відсіку 2 випробувального боксу. Далі впевнювалися, що у відсіку 1 покази комплексу для вимірювання оптичної щільності задимленого середовища відповідають показам для незадимленого середовища. Після цього відкривали заслінку 18, вмикали водяну завісу 7, за допомогою обох комплексів для вимірювання оптичної щільності

задимленого середовища (дим) 5 фіксували зменшення задимленості у відсіку 2 та збільшення задимленості у відсіку 1 до досягнення стабілізації значення показника (рівноваги), що вказувало на рівномірне розподілення диму у відсіках 1 та 2. Насамкінець завершували роботу, вмикали стенд та провітрювали обидва відсіки випробувального боксу від диму.

Аналогічно виконували дослідження із застосуванням суцільної водяної завіси 7, яку вмикали заздалегідь, перед відкриттям заслінки 18, а після відкриття заслінки 18 вмикали вентилятор 8 для створення надлишкового тиску у відсіку 2 випробувального боксу.

На рис. 8 наведено графіки середньоарифметичних значень зміни оптичної щільності середовища від проникнення диму крізь суцільну водяну завісу в часі у разі її роботи за результатами трьох дослідів.

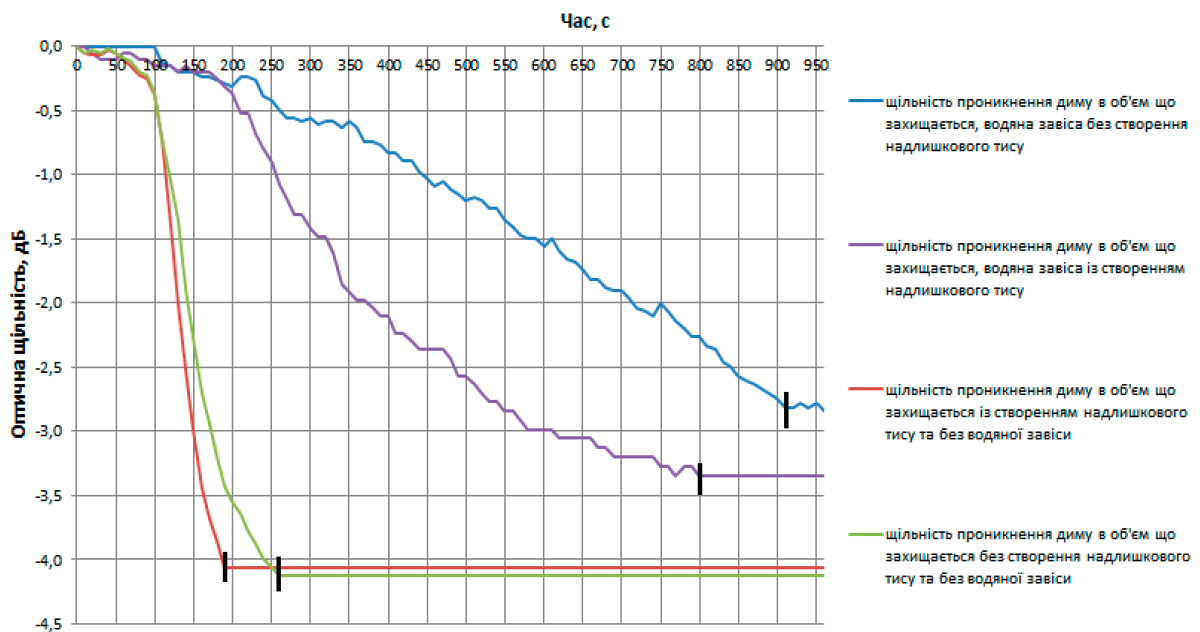


Рисунок 8 – Графік зміни оптичної щільності середовища від проникнення диму крізь суцільну водяну завісу в часі під час її роботи

Джерело: розробка авторів

Висновки та напрями подальших досліджень. 1. Аналіз отриманих результатів натурних експериментальних досліджень показав високу ефективність

суцільної водяної завіси щодо екранування від проникнення потоку теплового випромінювання: показник (коефіцієнт) екранування від проникнення потоку

теплого випромінювання $H_{т.в.}$ становить $(98 \pm 2)\%$ у разі витрати води на один погонний метр довжини завіси – $2,65 \text{ л/с} \times \text{пог.м.}$

2. Показник (коефіцієнт) екранування від проникнення диму H_d крізь суцільну водяну завісу у разі її роботи у діапазоні $(0-10)$ хв становить – $(88-23)\%$ за витрати води на один погонний метр довжини завіси – $2,65 \text{ л/с} \times \text{пог.м.}$

3. Для визначення залежностей значень екранувальних властивостей від потоку теплового випромінювання та диму необхідно продовжити ці дослідження для отримання масиву значень за різних концентрацій оптичної щільності диму та інтенсивностей теплового випромінювання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бенедюк В. С., Стилик І. Г., Тимошенко О. М. Результати лабораторних досліджень екрануючої здатності водяних завіс від проникнення небезпечних факторів пожежі. *Науковий вісник : Цивільний захист та пожежна безпека*. № 2(14). 2022. С. 52–64.
2. Провести дослідження ефективності застосування протипожежних водяних завіс для створення перешкоди поширенню пожежі між будинками та в будинках («ДИМОГАЗОПРРОНИКНІСТЬ»): звіт про НДР (заключний) ІДУ НД ЦЗ; кер. О. П. Борис, виконавці: В. С. Бенедюк, О. В. Корнієнко, О. М. Тимошенко. Київ, 2020. 296 с. № ОК 0118U004502.
3. Стационарні системи пожежогасіння. Дренчерні системи. Проектування, монтування та технічне обслуговування (CEN/TS 14816:2008, IDT): ДСТУ Б CEN/TS 14816:2013 [Чинний з 01.04.2014]. Київ: Мінрегіон України, Укрархбудінформ, 2013. 56 с.
4. Протипожежна техніка. Установки водяного пожежогасіння автоматичні. Зрошувачі для водяних завіс. Загальні технічні вимоги та методи випробовування: ДСТУ 5027:2008. [Чинний з 01.10.2010]. Київ: Держспоживстандарт України, 2010. 28 с.
5. Культурно-видовищні та дозвіллієві заклади: ДБН В.2.2-16-2019. [Чинний з 01.11.2019]. Київ: Мінрегіон України, 2019. 93 с.
6. В. Бенедюк, І. Стилик, О. Тимошенко, А. Грачов, Жартовська Є. Перспективи застосування полімерів гуанідинового ряду для підвищення ефективності протипожежних водяних завіс. Матеріали Х Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист», 29-30 жовтня. 2020 р. с. 127-128.
7. Jean-Marie Buchlin. Thermal shielding by water spray curtain. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Volume 18, Issues 4–6, 2005. P. 423–432.
8. Zhenhua Tang, Kun Zhao, Zhirong Wang, Jizhe Wang, Yi Pan. Study on the extension length of horizontal hydrogen jet fires under the action of water curtain. *Fuel*. Vol. 322. 2022. P. 134–145.
9. МЦІ 425441.008 ТУ Сповіщувач пожежний димовий лінійний АРТОН-ДЛ1.

REFERENCES

1. Benediuk, V. S., Stylyk, I. H., Tymoshenko, O. M. (2022). Rezultaty laboratornykh doslidzhen ekranuiuchoi zdatnosti vodianykh zavis vid pronyknennia nebezpechnykh faktoriv pozhezhi [Results of laboratory research of shielding ability of water curtain from penetration of dangerous factors of fire]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezha bezpeka*. № 2(14). 52–64. [in Ukrainian].
2. Provesty doslidzhennia efektyvnosti zastosuvannia protypozhezhnykh vodianykh zavis dlia stvorennia pereshkody poshyrenniu pozhezhi mizh budynkami ta v budynkakh («DYMOHAZOPRONYKNIST») [To conduct a study of the effectiveness of the use of fire-fighting water curtains to create an obstacle to the spread of fire between houses and in houses ("SMOKE AND GAS PERMEABILITY")]: zvit pro NDR (zakliuchnyi) / IDU ND TsZ; ker. Borys O.P., vykonavtsi: Benediuk V. S., Kornienko O. V., Tymoshenko O. M. Kyiv, 2020, 296 p. № ОК 0118U004502. [in Ukrainian].
3. DSTU B CEN/TS 14816:2013 Statsionarni systemy pozhezhohasinnia. Drencherni systemy. Proektuvannia, montuvannia ta tekhnichne obsluhovuvannia (CEN/TS 14816:2008, IDT) [Stationary fire extinguishing systems. Drainage systems. Design, installation and maintenance] from 1st april 2014 Kyiv: Minrehion Ukrainy, Ukrarkhbuildinform, 2013. P. 56. [in Ukrainian].
4. DSTU 5027:2008 Protypozhezhna tekhnika. Ustanovky vodianoho pozhezhohasinnia avtomatychni. Zroshuvachi dlia vodianykh zavis. Zahalni tekhnichni vymohy ta metody viprobovuvannia. [Fire fighting equipment. Water fire extinguishing installations are automatic. Sprinklers for water curtains. General technical requirements and test methods]. From 1st october 2010. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2010. 28 p. [in Ukrainian].
5. DBN V.2.2-16-2019 Kulturno-vydovyshechni ta dozvillevi zaklady. [Cultural and entertainment facilities] from 1st november. 2019. Kyiv: Minrehion Ukrainy, 2019. 93 p. [in Ukrainian].
6. Benediuk, V. S., Stylyk, I. H., Tymoshenko, O. M., Hrachov A. O., Zhartovska Ye. S. Perspektyvy zastosuvannia polimeriv huanidynovoho riadu dlia pidvyshchennia efektyvnosti protypozhezhnykh vodianykh zavis. *Materialy X vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii z miznarodnou uchasty Nadzvuchaini sutyacii: bezpeka ta zahust*. 29–30 october 2020, 127–128 p. [in Ukrainian].
7. Jean-Marie Buchlin. Thermal shielding by water spray curtain. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Volume 18, Issues 4–6. 2005. P. 423–432; [in English].
8. Zhenhua, Tang, Kun, Zhao, Zhirong, Wang, Jizhe, Wang, Yi, Pan. Study on the extension length of horizontal hydrogen jet fires under the action of water curtain. *Fuel*. Volume 322. 2022, P. 134–145 [in English].
9. MCI 425441.008 TU Spovishchuvach pozhheznyy dymovy liniinyi ARTON-DL1.

NATURAL EXPERIMENTAL STUDIES OF THE SHIELDING CAPACITY OF SOLID WATER CURTAINS AGAINST THE PENETRATION OF THERMAL RADIATION FLOW AND SMOKE

V. Benediuk, O. Tymoshenko, A. Onyshchuk, P. Illiuchenko, V. Kovalenko

Institute of Public Administration and Research in Civil Protection, Ukraine

KEYWORDS:

fire, fire protection, continuous, drenched and finely sprayed water curtain, radiation heat flux density, smoke optical density, shielding ability, technical devices for creating water curtains.

ANNOTATION

Analytical research of the current Ukrainian and foreign regulatory documentation and other available sources of information on the effectiveness of the using of water curtains to prevent (reduce) the effect of fire and its dangerous factors on people, industrial equipment, property and constructions of buildings and structures have been performed. Established, that Ukrainian regulatory documents which regulate requirements for the necessary parameters of water curtains don't have requirements for indicators of the shielding ability of these curtains against the penetration of the flow of thermal radiation and smoke. Other problematic issues were identified and the relevance of further research on their solution was confirmed. Previously was conducted laboratory research on shielding ability of continuous water curtain against penetration of thermal radiation and smoke, in particular, with using of chemical additives to water, which improves the hydrodynamic characteristics of the water flow. Appropriate test equipment has been developed and created for conducting full-scale experimental research to determine the shielding parameters against the penetration of heat radiation and smoke through the water curtain in the form of a continuous water stream falling under pressure from the drain device from top to bottom. A series of full-scale experimental research on the protection properties of a continuous water curtain, a drench and finely sprayed curtain in the opening of the wall of a building structure against the penetration of heat radiation and smoke flow through it was conducted, and results are given. The obtained results of field experimental research were used in the development of Recommendations of using of water curtains in fire protection systems of Ukraine. In the future Recommendation can be used while developing the technical requirements for system which creates a water curtain in composition of regulatory and other documents (DSTU, DBN, technical conditions, design and project documentation, etc.), for the purpose of ensuring fire safety requirements at fire-hazardous facilities in accordance with the Fire Safety Rules in Ukraine.

УДК 614.841.45

ВПЛИВ ВІДХИЛУ ТЕМПЕРАТУРИ В ПЕЧІ ВІД НОМІНАЛЬНОГО РЕЖИМУ НА РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАННЯ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ВОГНЕСТІЙКІСТЬ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2.88-104>

Новак С. В.^{1*}, ORCID iD 0000-0001-7087-318X

Новак М. С.², ORCID iD 0000-0002-5888-5812

Пустовий М. М.³, ORCID iD 0000-0003-1434-4296

*E-mail: novak.s.fire@gmail.com

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

²Національний університет харчових технологій, Україна

³Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції:

29.09.2023

Пройшла рецензування:

19.10.2023

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

граничний стан за вогнестійкістю, відхил температури, критична температура, температурний режим, проміжок часу вогневого впливу, сталева конструкція, теплофізичні властивості.

АНОТАЦІЯ

Дослідження присвячене оцінюванню проміжку часу до настання граничного стану сталевих конструкцій за ознакою втрати несучої здатності з урахуванням наявності відхилу фактичної температури в печі від номінального режиму під час їхнього випробування на вогнестійкість за національними і європейськими стандартами. За мету ставилось виявлення залежності між цим проміжком часу для таких сталевих конструкцій, як балки і колони з одношаровою системою вогнезахисту, і відхилом фактичної температури в печі від номінального режиму, а також визначення процедури коригування отриманих показників щодо цього проміжку часу для усунення впливу такого відхилу температури на результати випробування. Із застосуванням метода обчислювального експерименту, який ґрунтується на розв'язуванні прямої одномірної задачі теплопровідності, визначено дані щодо різниці між значеннями цього проміжку часу, отриманими за мінімально та максимально допустимих температур в печі, і значенням цього проміжку часу для номінального температурного режиму. Виявлено закономірності щодо впливу відхилу фактичної температури в печі від номінального режиму на результати випробування сталевих конструкцій в умовах стандартного температурного режиму за EN 1363-1:2020 і ДСТУ Б В.1.1-4-98*. Встановлено, що різниця між значеннями проміжку часу до досягнення на металевій поверхні сталеві конструкції з одношаровою системою вогнезахисту критичної температури 500 °С, отриманими за фактичним і номінальним температурними режимами в печі, залежить від проміжку часу вогневого впливу і показника відхилу між цими режимами, і не залежить від теплофізичних властивостей вогнезахисного покриття. Найбільші величини цієї різниці є різними для допустимих відхилів, регламентованих у національному і європейському стандартах. Для умов національного стандарту з підвищенням проміжку часу вогневого впливу від 30 хв до 240 хв величина цієї різниці зменшується від 14,7% до 3,3%, а для європейського стандарту – від 6,6% до 2,4%. Визначено процедуру коригування отриманих під час випробування показників щодо проміжку часу до настання граничного стану сталеві конструкції з одношаровою системою вогнезахисту за ознакою втрати несучої здатності, яка дає змогу усунути вплив відхилу фактичного температурного режиму в печі від номінального на результати випробування.

Постановка проблеми. Для оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій застосовують методи випробування, які наведено в європейських і національних стандартах, зокрема в EN 1365-3 [1] і ДСТУ Б В.1.1-13 [2] – для балок, в EN 1365-4 [3] і ДСТУ Б В.1.1-14 [4] – для колон. Під час цих випробувань визначають проміжки часу від початку вогневого впливу (від початку випробування) за стандартного температурного режиму до настання граничного стану зазначених будівельних конструкцій за ознакою втрати несучої здатності. Номінальну залежність температури в печі від проміжку часу вогневого впливу для цього режиму регламентовано в EN 1363-1 [5] і ДСТУ Б В.1.1-4 [6]. Враховуючи те, що практично неможливо в печі забезпечити температурний режим, який точно відтворює номінальну залежність, в цих же стандартах наведено допустимі відхилення від неї.

Наявність відхилення фактичної температури в печі від номінального режиму може зумовити похибки в результатах випробування сталевих конструкцій на вогнестійкість. Отже, показники щодо проміжку часу до настання граничного стану за ознакою втрати несучої здатності, отримані за фактичного температурного режиму в печі, можливо слід коригувати (приводити до номінального температурного режиму) для їхнього подальшого врахування під час оцінювання вогнестійкості зазначених конструкцій. Однак є невизначеність стосовно значень таких похибок і процедури цього коригування.

З огляду на доцільність підвищення точності оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій актуальним слід вважати дослідження, спрямоване на подальше удосконалення і розвиток методів їх випробування на вогнестійкість за допомогою розроблення та впровадження процедури коригування отриманих результатів визначення проміжку часу до настання граничного стану (приведення їх до номінального

температурного режиму).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Температура димових газів у печі й тепловий потік на поверхні виробу є основними параметрами, що визначають граничні умови щодо впливу теплового середовища на зразки будівельних конструкцій, які піддають випробуванням на вогнестійкість [7]. Геометрія і форма печей, призначених для випробувань на вогнестійкість, впливають на ці граничні умови, однак вони не визначені у жодному нормативному документі [8].

Печі повинні бути гармонізовані таким чином, щоб мінімізувати різницю в їхніх теплових характеристиках, які впливають на зазначені умови [9]. На думку авторів [9], економічним варіантом такої гармонізації є збереження наявних печей і заміна засобів вимірювання температури димових газів, що використовують для керування піччю, зі звичайних стрижневих термопар на пластинчасті термометри, щоб враховувати більш реалістичне співвідношення конвекційної та радіаційної складових теплового потоку на поверхні виробу. За результатами дев'яти випробувань, проведених на двох газових печах і одній печі на рідкому пальному, встановлено, що керування температурного режиму за допомогою пластинчастих термометрів помітно зменшило різницю між розподілами температури на калібрувальній пластині порівняно з випадком застосування стрижневих термопар [9]. Також у цій роботі показано, що середня температура 4 пластинчастих термометрів завжди нижча за середню температуру 5 стрижневих термопар із незахищеним вимірювальним спаєм і пояснюється, що ця різниця пов'язана з більшою тепловою інерційністю (постійною часу) пластинчастих термометрів.

Через дослідження теплової інерційності стрижневих термопар встановлено, що похибки, пов'язані з вимірюванням температури в печі за їх застосування, є значними в перші 20 хв випробування [10]. Завдяки розвідці,

проведеній для порівняння різних засобів вимірювання температури в печі, з'ясовано, що для проміжку часу вогневого впливу до 8 хв різниця між показами температури у горизонтальній або вертикальній печі, визначеними екранованими стрижневими термopарами та пластинчастими термометрами, є значною, і це може вплинути на результати випробувань малої тривалості [11]. У роботі [12] показано, для тривалості до 10 хв різниця між показами температури у печі, визначеними екранованими стрижневими термopарами, пластинчастими термометрами, спрямованими полумєневими термометрами і стрижневими термopарами з незахищеним вимірювальним spaєм, є значною незалежно від типу засобу вимірювання, який використовують для керування пiччю. Однак після 10 хв ця різниця стає незначною, за винятком термopар із незахищеним вимірювальним spaєм, для яких покази температури трохи більші, ніж для інших трьох типів засобів вимірювання.

У роботі [13] показано, що під час випробування таких сталевих конструкцій, як балки і колони з одношаровою системою вогнезахисту за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожеж, проміжок часу до настання граничного стану за ознакою втрати несучої здатності суттєво відрізняється від проміжку, отриманого за стандартного режиму, і ця різниця може досягати 108%.

Незважаючи на практичну значущість результатів наведених вище досліджень, достатньою мірою не розглянуто вплив відхилення фактичного температурного режиму в печі від номінального на проміжок часу до настання граничного стану сталевих конструкцій за вогнестійкістю. В міжнародних, регіональних і національних стандартах регламентовано номінальні залежності температури в печі від проміжку часу вогневого впливу і допустимі відхилення, зокрема для стандартного режиму їх наведено в ISO 834-1 [14], EN 1363-1 [5] і

ДСТУ Б В.1.1-4 [6], але не вказано даних щодо можливого впливу цих відхилень на проміжок часу до настання граничного стану конструкцій за вогнестійкістю. Отже, є підстави вважати, що недостатня визначеність цього впливу, який стосується відхилення фактичного температурного режиму в печі від номінального, зумовлює необхідність проведення дослідження у цьому напрямі.

Формулювання цілей дослідження. За мету дослідження ставилось виявлення залежності між проміжком часу до настання граничного стану за ознакою втрати несучої здатності таких сталевих конструкцій, як балки і колони з одношаровою системою вогнезахисту (далі – сталеві конструкції), і відхиленням фактичної температури в печі від номінального режиму, а також визначення процедури коригування отриманих показників щодо цього проміжку часу для усунення впливу зазначеного відхилення температури на результати випробування.

Для досягнення зазначеного поставлено такі завдання:

- для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму і широкого діапазону теплофізичних властивостей вогнезахисного покриття (його коефіцієнта теплопровідності та питомої об'ємної теплоємності) визначити дані щодо різниці між значеннями проміжку часу до настання граничного стану сталеві конструкції за ознакою втрати несучої здатності, отриманими за мінімально і максимально допустимих температур у печі T_{min} і T_{max} , і значенням цього проміжку часу, визначеним за номінального температурного режиму T_s [5–6];

- виявити залежності різниці між проміжками часу до настання граничного стану сталеві конструкції за ознакою втрати несучої здатності, отриманими за фактичним і номінальним температурними режимами в печі, від параметрів сталеві конструкції (теплофізичних властивостей вогнезахисного покриття, проміжку часу до настання граничного стану) і відхилення

фактичного температурного режиму в печі від номінального;

– визначити процедуру коригування отриманих показників щодо проміжку часу до настання граничного стану сталевій конструкції за ознакою втрати несучої здатності для усунення впливу відхилення фактичного температурного режиму в печі від номінального на результати випробування на вогнестійкість.

Методи дослідження. Застосовано метод дослідження, складовими якого є обчислювальна процедура чисельного моделювання теплового стану сталевій конструкції, оснащеної вогнезахисним покриттям із заданими теплофізичними властивостями, в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму (процедура розв’язання прямої задачі теплопровідності), процедури аналізу, порівняння, узагальнення, апроксимації та систематизації отриманих розрахункових даних із використанням лінійного числового регресійного аналізу. За критерій настання граничного стану сталевій конструкції за ознакою втрати несучої здатності брали досягнення критичної температури сталевій конструкції (далі – критичної температури), яка дорівнює 500 °C [6; 15–16]. Обчислювальні експерименти виконували за допомогою розв’язання прямої задачі теплопровідності для сталевій конструкції, яка має коефіцієнт поперечного перерізу 200 м⁻¹ (товщину 5 мм). Для розрахунку теплового стану сталевій конструкції в умовах вогневого впливу (температури сталі для різних проміжків часу вогневого впливу) використано одновимірну двошарову математичну модель теплопровідності, яка складається із системи рівнянь, наведеної в [17]. Значення коефіцієнтів тепловіддачі конвекцією і теплового випромінювання на обігрівній поверхні вогнезахисного покриття, теплофізичні властивості сталі та інші параметри цієї моделі вибрані

такими, як наведено в [15–16]. Розв’язання математичної моделі й прямої задачі теплопровідності з визначення температури сталі виконано методом кінцевих різниць за неявною схемою апроксимації [18].

Виклад основного матеріалу. За формулою (1) розраховували значення мінімально і максимально допустимих температур у печі (T_{min} і T_{max} , табл. 1) для стандартного температурного режиму, визначеного в ДСТУ Б В.1.1-4 [6]. Під час цих розрахунків враховували положення цього національного стандарту про те, що відхил d середньої температури в печі (далі – температури в печі) від її номінального значення T_s , залежно від проміжку часу t (хв) від початку вогневого впливу (від початку випробування) не повинен перевищувати таких значень:

- а) $\pm 15 \%$ для $5 < t \leq 10$;
- б) $\pm 15 - 0,5(t - 10) \%$ для $10 < t \leq 30$;
- в) $\pm 5 - 0,083(t - 30) \%$ для $30 < t \leq 60$;
- г) $\pm 2,5 \%$ для $t > 60$.

$$T_{min(max)} = T_s(1 + d_{lim}/100), \quad (1)$$

де $T_{min(max)}$ – значення мінімально або максимально допустимої температури в печі (T_{min} або T_{max}) для проміжку часу вогневого впливу t , °C;

T_s – номінальне значення температури в печі для проміжку часу вогневого впливу t , °C;

d_{lim} – допустимий відхил температури в печі від її номінального значення T_s , який залежить від проміжку часу вогневого впливу t і становить від $-2,5\%$ до $-15,0\%$ для мінімально допустимого режиму (d_{min} , табл. 1) і від $2,5\%$ до $15,0\%$ для максимально допустимого режиму (d_{max} , табл. 1). Для проміжку часу вогневого впливу від 0 до 5 хв під час розрахунків значення відхилення d_{lim} брали такі ж, як і для інтервалу $5 < t \leq 10$.

Таблиця 1 – Значення температури в печі для мінімально і максимально допустимих температурних режимів у печі за національним і європейським стандартами

t , хв	T_s , °C	Дані за ДСТУ Б В.1.1-4 [6]						Дані за EN 1363-1 [5]			
		T_{min} , °C	d_{min} , %	$d_{e,min}$, %	T_{max} , °C	d_{max} , %	$d_{e,max}$, %	$T_{min,e}$, °C	$d_{e,min,e}$, %	$T_{max,e}$, °C	$d_{e,max,e}$, %
0	20	20	0	0	20	0	0	20	0	20	0
2	444	378	-15	-14,88	511	15	14,88	375	-15	514	15
4	544	462	-15	-14,95	625	15	14,95	459	-15	628	15
6	603	512	-15	-14,97	693	15	14,97	510	-15	697	15
8	645	548	-15	-14,98	742	15	14,98	546	-15	745	15
10	678	576	-15	-14,99	780	15	14,99	583	-15	765	15
15	738	646	-12,5	-14,47	830	12,5	14,47	691	-12,5	786	12,5
20	781	703	-10	-13,49	859	10	13,49	767	-10	796	10
25	814	753	-7,5	-12,35	875	7,5	12,35	837	-7,5	792	7,5
30	841	799	-5	-11,13	883	5	11,13	860	-5	824	5
35	864	825	-4,59	-10,05	904	4,59	10,05	846	-4,59	884	4,59
40	884	847	-4,17	-9,21	921	4,17	9,21	872	-4,17	897	4,17
50	918	887	-3,34	-7,93	948	3,34	7,93	919	-3,34	917	3,34
60	945	921	-2,5	-6,95	969	2,5	6,95	946	-2,5	945	2,5
80	988	963	-2,5	-5,67	1013	2,5	5,67	964	-2,5	1013	2,5
100	1021	996	-2,5	-4,94	1047	2,5	4,94	996	-2,5	1047	2,5
120	1049	1022	-2,5	-4,47	1075	2,5	4,47	1023	-2,5	1075	2,5
140	1072	1045	-2,5	-4,15	1099	2,5	4,15	1045	-2,5	1099	2,5
160	1092	1064	-2,5	-3,91	1119	2,5	3,91	1065	-2,5	1119	2,5
180	1109	1082	-2,5	-3,73	1137	2,5	3,73	1082	-2,5	1137	2,5
200	1125	1097	-2,5	-3,59	1153	2,5	3,59	1097	-2,5	1154	2,5
220	1139	1111	-2,5	-3,48	1168	2,5	3,48	1111	-2,5	1168	2,5
240	1152	1124	-2,5	-3,38	1181	2,5	3,38	1124	-2,5	1182	2,5

За номінального значення температури в печі T_s за процедурою [18] через розв'язання прямої задачі теплопровідності визначали мінімальну товщину вогнезахисного покриття $d_{p,min}$, за якої для певного номінального проміжку часу вогневого впливу t_{fr} розрахункова температура (далі – температура сталі) на металевій поверхні сталевій конструкції (під шаром вогнезахисного покриття) з коефіцієнтом поперечного перерізу 200 м^{-1} дорівнює критичній температурі, яка становить $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Ці розрахунки виконували за таких значень коефіцієнта теплопровідності й питомої об'ємної теплоємності вогнезахисного покриття: $\lambda_{p,min} = 0,02 \text{ Вт/(м} \cdot ^{\circ}\text{C)}$; $\lambda_{p,med} = 0,2 \text{ Вт/(м} \cdot ^{\circ}\text{C)}$; $\lambda_{p,max} = 2,0 \text{ Вт/(м} \cdot ^{\circ}\text{C)}$; $(c_p \rho_p)_{min} = 0,1 \text{ МДж/(м}^3 \cdot ^{\circ}\text{C)}$; $(c_p \rho_p)_{med} = 0,5 \text{ МДж/(м}^3 \cdot ^{\circ}\text{C)}$; $(c_p \rho_p)_{max} = 1,0 \text{ МДж/(м}^3 \cdot ^{\circ}\text{C)}$, і номінального проміжку часу вогневого впливу: $t_{fr,min} = 30 \text{ хв}$; $t_{fr,med} = 90 \text{ хв}$; $t_{fr,max} = 240 \text{ хв}$. Результати цих розрахунків наведено в табл. 2.

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

$c_p \rho_p$, МДж/ ($\text{м}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$)	λ_p , Вт/($\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C}$)	Необхідна мінімальна товщина вогнезахисного покриття $d_{p,min}$ (у мм) для:		
		$t_{fr,min}$	$t_{fr,med}$	$t_{fr,max}$
0,1	0,02	1,33	5,86	19,0
0,5	0,02	1,31	5,53	16,2
1,0	0,02	1,28	5,20	14,2
0,1	0,2	12,8	52,0	142
0,5	0,2	11,4	38,7	88,5
1,0	0,2	10,1	31,6	68,3
0,1	2,0	101	316	683
0,5	2,0	63,5	172	343
1,0	2,0	47,5	126	249

Із аналізу даних, наведених у табл. 2, випливає, що для застосованого під час розрахунків діапазону параметрів сталевій конструкції (λ_p , $c_p \rho_p$, t_{fr}) величина необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття $d_{p,min}$ змінюється від 1,28 мм до 683 мм і суттєво залежить від значень коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного покриття λ_p та проміжку часу t_{fr} . Вплив питомої об'ємної

теплоємності вогнезахисного покриття $c_p\rho_p$ на величину товщини $d_{p,min}$ є значним для максимального значення коефіцієнта теплопровідності $\lambda_{p,max} = 2,0$ Вт/(м·°C), а для менших значень цього коефіцієнта він зменшується. Є закономірність щодо співвідношення значень товщини $d_{p,min}$, визначених для $(c_p\rho_p)_{max} = 1,0$ МДж/(м³·°C), $\lambda_{p,min} = 0,02$ Вт/(м·°C) і $(c_p\rho_p)_{min} = 0,1$ МДж/(м³·°C), $\lambda_{p,med} = 0,2$ Вт/(м·°C), а також $(c_p\rho_p)_{max} = 1,0$ МДж/(м³·°C), $\lambda_{p,med} = 0,2$ Вт/(м·°C) і $(c_p\rho_p)_{min} = 0,1$ МДж/(м³·°C), $\lambda_{p,max} = 2,0$ Вт/(м·°C). Величина цього співвідношення для всіх значень проміжку часу t_{fr} складає 0,1. Наприклад, для $t_{fr,min} = 30$ хв і $(c_p\rho_p)_{max} = 1,0$ МДж/(м³·°C), $\lambda_{p,min} = 0,02$ Вт/(м·°C) товщина $d_{p,min}$ дорівнює 1,28 мм, для $(c_p\rho_p)_{max} = 1,0$ МДж/(м³·°C), $\lambda_{p,med} = 0,2$ Вт/(м·°C) ця товщина – 12,8 мм, а їхнє співвідношення становить 0,1. Слід зазначити, що вказане співвідношення значень товщини $d_{p,min}$ дорівнює співвідношенню значень питомої об'ємної теплоємності вогнезахисного покриття $(c_p\rho_p)_{min} = 0,1$ МДж/(м³·°C) і $(c_p\rho_p)_{max} = 1,0$ МДж/(м³·°C). Водночас для співвідношення значень товщини $d_{p,min}$, визначених для $(c_p\rho_p)_{max} = 1,0$ МДж/(м³·°C), $\lambda_{p,min} = 0,02$ Вт/(м·°C) і $(c_p\rho_p)_{min} = 0,1$ МДж/(м³·°C), $\lambda_{p,med} = 0,2$ Вт/(м·°C), добуток коефіцієнта теплопровідності й питомої об'ємної теплоємності вогнезахисного покриття $\lambda_p c_p \rho_p$ є однаковим: $\lambda_{p,min}(c_p\rho_p)_{max} = 0,02 \cdot 1,0 = 0,02$; $\lambda_{p,med}(c_p\rho_p)_{min} = 0,2 \cdot 0,1 = 0,02$. Для співвідношення значень товщини $d_{p,min}$, визначених для $(c_p\rho_p)_{max} = 1,0$ МДж/(м³·°C), $\lambda_{p,med} = 0,2$ Вт/(м·°C) і $(c_p\rho_p)_{min} = 0,1$ МДж/(м³·°C), $\lambda_{p,max} = 2,0$ Вт/(м·°C) цей добуток $\lambda_p c_p \rho_p$ теж є однаковим, хоча має іншу величину: $\lambda_{p,med}(c_p\rho_p)_{max} = 0,2 \cdot 1,0 = 0,2$; $\lambda_{p,max}(c_p\rho_p)_{min} = 2,0 \cdot 0,1 = 0,2$.

За мінімально і максимально допустимих температур у печі T_{min} і T_{max} , наведених у табл. 1, через розв'язання прямої задачі теплопровідності із

застосуванням отриманих даних щодо товщини $d_{p,min}$ (табл. 2) визначали проміжок часу вогневого впливу ($t_{fr,Tmin}$ або $t_{fr,Tmax}$), за якого температура сталі дорівнює 500 °C. Результати цих розрахунків наведено в табл. 3, 4, в яких $d_{p,min,30}$, $d_{p,min,90}$, $d_{p,min,240}$ – це значення товщини вогнезахисного покриття, які дорівнюють величинам його необхідної мінімальної товщини $d_{p,min}$ (див. табл. 2), отриманим відповідно для проміжків часу вогневого впливу $t_{fr,min} = 30$ хв, $t_{fr,med} = 90$ хв, $t_{fr,max} = 240$ хв за стандартного температурного режиму (за його номінальних значень T_s (табл. 1)).

Таблиця 3 – Результати розрахунку проміжку часу $t_{fr,Tmin}$

$c_p\rho_p$, МДж/ (м³·°C)	λ_p , Вт/(м·°C)	Проміжок часу $t_{fr,Tmin}$ (у хв) для:		
		$d_{p,min,30}$	$d_{p,min,90}$	$d_{p,min,240}$
0,1	0,02	34,4	95,2	248,6
0,5	0,02	34,4	95,1	248,1
1,0	0,02	34,3	95,1	248,1
0,1	0,2	34,3	95,1	248,1
0,5	0,2	34,4	95,1	247,9
1,0	0,2	34,3	95,1	248,0
0,1	2,0	34,3	95,5	248,1
0,5	2,0	34,6	95,4	247,9
1,0	2,0	34,7	95,3	248,8

Таблиця 4 – Результати розрахунку проміжку часу $t_{fr,Tmax}$

$c_p\rho_p$, МДж/ (м³·°C)	λ_p , Вт/(м·°C)	Проміжок часу $t_{fr,Tmax}$ (у хв) для:		
		$d_{p,min,30}$	$d_{p,min,90}$	$d_{p,min,240}$
0,1	0,02	26,0	85,1	231,1
0,5	0,02	26,0	85,1	231,2
1,0	0,02	25,9	85,1	231,8
0,1	0,2	25,9	85,1	232,2
0,5	0,2	26,0	85,2	232,3
1,0	0,2	25,8	85,1	232,8
0,1	2,0	25,8	85,1	232,7
0,5	2,0	25,8	85,1	232,2
1,0	2,0	25,7	84,7	232,9

Із аналізу даних, наведених у табл. 3, 4, випливає, що для застосованого під час розрахунків діапазону параметрів сталевій конструкції проміжок часу вогневого впливу ($t_{fr,Tmin}$ або $t_{fr,Tmax}$), за якого температура сталі дорівнює критичній температурі 500 °C, змінюється від 34,3 хв

до 248,8 хв і від 25,7 хв до 232,9 хв, відповідно за умов забезпечення мінімально і максимально допустимих температур в печі (T_{min} і T_{max}), наведених у табл. 1. Середні значення проміжків часу становлять: 34,41 хв; 95,21 хв; 248,18 хв – для $t_{fr,Tmin}$, і 25,88 хв; 85,07 хв; 232,13 хв – для $t_{fr,Tmax}$. Відносні стандартні відхили (відносні середньо квадратичні відхили) становлять: 0,42%; 0,16%; 0,13% – для $100S_{Tmin}/t_{fr,Tmin}$, і 0,42%; 0,17%; 0,28% – для $100S_{Tmax}/t_{fr,Tmax}$. Такі малі величини відхилів свідчать про несуттєвий вплив коефіцієнта теплопровідності й питомої об'ємної теплоємності вогнезахисного покриття на проміжки часу до досягнення критичної температури 500 °С.

У табл. 5, 6 наведено дані щодо різниці між значенням проміжку часу до досягнення критичної температури 500 °С ($t_{fr,Tmin}$ або $t_{fr,Tmax}$, табл. 3, 4), отриманим за умови, що температура в печі дорівнює мінімально допустимому значенню T_{min} або максимально допустимому значенню T_{max} (табл. 1), і значенням цього ж проміжку часу t_{fr} ($t_{fr,min} = 30$ хв; $t_{fr,med} = 90$ хв; $t_{fr,max} = 240$ хв) за номінального температурного режиму T_s (табл. 1). Цю різницю розраховували за такими формулами:

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

$$\delta_{t,Tmax} = 100(t_{fr,Tmax} - t_{fr})/t_{fr}, \quad (3)$$

де $\delta_{t,Tmin}$ – різниця між значенням проміжку часу до досягнення критичної температури 500 °С, отриманим за мінімально допустимої температури в печі T_{min} , і значенням цього ж проміжку часу за номінальної температури T_s , %;

$\delta_{t,Tmax}$ – різниця між значенням проміжку часу до досягнення критичної температури 500 °С, отриманим за максимально допустимої температури в печі T_{max} , і значенням цього ж проміжку часу за номінальної температури T_s , %;

$t_{fr,Tmin}$ і $t_{fr,Tmax}$ – значення проміжку часу до досягнення критичної температури 500 °С, отримані відповідно за мінімально і максимально допустимою температурою

в печі (T_{min} і T_{max}), які наведено в табл. 3, 4, хв;

t_{fr} – значення проміжку часу до досягнення критичної температури 500 °С за номінальної температури (T_s), $t_{fr,min} = 30$ хв; $t_{fr,med} = 90$ хв; $t_{fr,max} = 240$ хв.

Таблиця 5 – Результати розрахунку різниці $\delta_{t,Tmin}$

$c_p \rho_p$, МДж/ (м ³ ·°С)	λ_p , Вт/(м·°С)	Різниця $\delta_{t,Tmin}$ (у %) для:		
		$t_{fr,min}$	$t_{fr,med}$	$t_{fr,max}$
0,1	0,02	14,67	5,78	3,58
0,5	0,02	14,67	5,67	3,38
1,0	0,02	14,33	5,67	3,38
0,1	0,2	14,33	5,67	3,38
0,5	0,2	14,67	5,67	3,29
1,0	0,2	14,33	5,67	3,33
0,1	2,0	14,33	6,11	3,38
0,5	2,0	15,33	6,00	3,29
1,0	2,0	15,67	5,89	3,67

Таблиця 6 – Результати розрахунку різниці $\delta_{t,Tmax}$

$c_p \rho_p$, МДж/ (м ³ ·°С)	λ_p , Вт/(м·°С)	Різниця $\delta_{t,Tmax}$ (у %) для:		
		$t_{fr,min}$	$t_{fr,med}$	$t_{fr,max}$
0,1	0,02	-13,33	-5,44	-3,71
0,5	0,02	-13,33	-5,44	-3,67
1,0	0,02	-13,67	-5,44	-3,42
0,1	0,2	-13,67	-5,44	-3,25
0,5	0,2	-13,33	-5,33	-3,21
1,0	0,2	-14,00	-5,44	-3,00
0,1	2,0	-14,00	-5,44	-3,04
0,5	2,0	-14,00	-5,44	-3,25
1,0	2,0	-14,33	-5,89	-2,96

Із аналізу даних, наведених у табл. 5, 6, випливає, що для застосованого під час розрахунків діапазону параметрів сталевих конструкцій значення різниць $\delta_{t,Tmin}$ і $\delta_{t,Tmax}$ змінюється від 3,29% до 15,67% і від -2,96% до -14,33% відповідно. Кореляції між цими різницями, коефіцієнтом теплопровідності λ_p і питомою об'ємною теплоємністю $c_p \rho_p$ вогнезахисного покриття не спостерігається. Існує їхня залежність від проміжку часу t_{fr} , яку наведено на рис. 1. Закономірним є зменшення (за модулем) різниць $\delta_{t,Tmin}$ і $\delta_{t,Tmax}$ з підвищенням проміжку часу t_{fr} . Цю графічну залежність побудовано за даними щодо середніх

значень, які мають різниці $\delta_{t,Tmin}$ і $\delta_{t,Tmax}$ для проміжків часу $t_{fr,min}$, $t_{fr,med}$, $t_{fr,max}$ (див. табл. 7). Стандартні відхилення (S_{Tmin} , S_{Tmax}) від середніх значень різниць $\delta_{t,Tmin}$ і $\delta_{t,Tmax}$ становлять: 0,48%; 0,17%; 0,13% – для $t_{fr,min,Tmin}$; $t_{fr,med,Tmin}$; $t_{fr,max,Tmin}$, і 0,36%; 0,16%; 0,27% – для $t_{fr,min,Tmax}$; $t_{fr,med,Tmax}$; $t_{fr,max,Tmax}$. Такі малі величини відхилів свідчать про несуттєвий вплив коефіцієнта теплопровідності й питомої об'ємної теплоємності вогнезахисного покриття на різницю між значеннями проміжку часу до досягнення критичної температури 500 °С, отриманими за умовами наявності відхилів температури в печі від номінального режиму. Це обґрунтовує застосування надалі в розрахунках середніх значень різниць, зокрема $\delta_{t,Tmin}$ і $\delta_{t,Tmax}$.

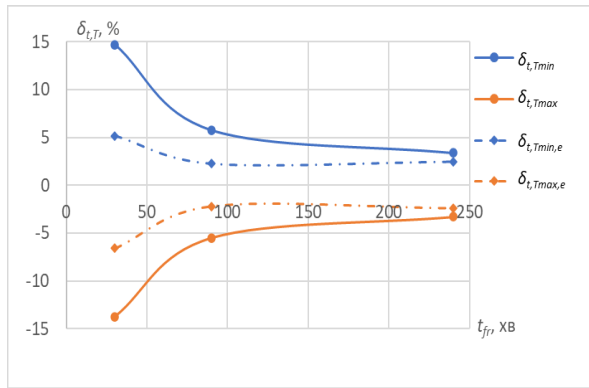


Рисунок 1 – Залежності різниць між значеннями проміжку часу до досягнення критичної температури 500 °С, отриманими за мінімально і максимально допустимими температурними режимами в печі, і цим проміжком часу за номінальної температури в печі від t_{fr} .

Таблиця 7 – Результати розрахунку середніх значень різниць $\delta_{t,Tmin}$ і $\delta_{t,Tmax}$

Проміжок часу t_{fr} , хв	Середнє значення різниці $\delta_{t,Tmin}$, %	Середнє значення різниці $\delta_{t,Tmax}$, %
30	14,70	-13,74
90	5,79	-5,48
240	3,41	-3,28

На рис. 2 наведено залежності різниці $\delta_{t,T}$ між значеннями проміжку часу до досягнення критичної температури

500 °С, отриманим за певного фактичного температурного режиму в печі $T_i(t)$, який відрізняється від номінального $T_s(t)$, і значенням цього ж проміжку часу за номінального температурного режиму $T_s(t)$, від показника d_e , який визначає ступінь відхилення між цими режимами, для різних проміжків часу t_{fr} . Як показник, що визначає ступінь відхилення між фактичним і номінальним температурними режимами в печі, взято відносний відхил d_e (формула (4)) площі під кривою фактичної температури в печі $T_i(t)$ від площі під кривою номінального температурного режиму $T_s(t)$. Для побудови рис. 2 використано дані щодо різниці $\delta_{t,T}$, наведені в табл. 7 і дані про те, що за відсутності відхилення між фактичним і номінальним температурними режимами в печі різниця $\delta_{t,T}$ дорівнює нулю. Також застосовано дані про значення відхилення d_e для температурних режимів з мінімально і максимально допустимими температурами T_{min} і T_{max} , наведеними в табл. 1, яке становить для $t = 30$ хв: -11,13% і 11,13% для $T_{min}(t)$ і $T_{max}(t)$; для $t = 90$ хв: -5,26% і 5,26% для $T_{min}(t)$ і $T_{max}(t)$; для $t = 240$ хв: -3,38 % і 3,38 % для $T_{min}(t)$ і $T_{max}(t)$. Водночас визначення даних щодо площ A_i і A_s здійснювали за формулами (Г.1) і (Г.2) ДСТУ Б В.1.1-4 [6].

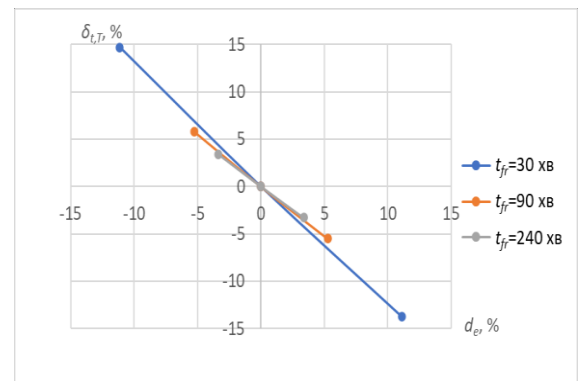


Рисунок 2 – Залежність різниці $\delta_{t,T}$ від відхилення d_e для різних проміжків часу t_{fr}

$$d_e = 100(A_i - A_s)/A_s, \quad (4)$$

де d_e – відхил площі під кривою фактичної температури в печі $T_i(t)$ від площі під кривою номінального температурного режиму $T_s(t)$, %;

A_i – площа під фактичною кривою температурного режиму в печі $T_i(t)$, °С·хв;

A_s – площа під кривою номінального температурного режиму $T_s(t)$, °С·хв.

Із аналізу рис. 2 випливає, що залежність різниці $\delta_{t,T}$ від відхилу d_e має лінійний характер, а вплив відхилу d_e на значення різниці δ_t є найбільший для проміжку часу $t_{fr} = 30$ хв і найменший для $t_{fr} = 240$ хв.

Для апроксимації отриманих розрахункових даних щодо різниці між значеннями проміжку часу до досягнення критичної температури 500 °С, отриманими за фактичним і номінальним температурними режимами в печі, здійснено лінійний числовий регресійний аналіз із застосуванням такого рівняння:

$$\delta_{t,T} = a_0 + a_1 d_e + a_2 d_e t_{fr,T} + a_3 t_{fr,T}, \quad (5)$$

де $\delta_{t,T}$ – різниця між значенням проміжку часу до досягнення критичної температури 500 °С ($t_{fr,T}$), отриманим за певного фактичного температурного режиму в печі $T_i(t)$, і

значенням цього ж проміжку часу (t_{fr}) за номінального температурного режиму $T_s(t)$, %;

d_e – відхил площі під кривою фактичної температури в печі $T_i(t)$ від площі під кривою номінального температурного режиму $T_s(t)$, %;

$t_{fr,T}$ – проміжок часу до досягнення критичної температури 500 °С, отриманий за фактичного температурного режиму в печі $T_i(t)$, хв;

a_0, a_1, a_2, a_3 – коефіцієнти регресії.

Розв'язуючи рівняння регресії (5) за даними щодо середніх значень різниць $\delta_{t,Tmin}$ і $\delta_{t,Tmax}$ (табл. 7) і проміжків часу $t_{fr,Tmin}$ і $t_{fr,Tmax}$ (табл. 3, 4), наведеними в табл. 8, із застосуванням програми для роботи з електронними таблицями Microsoft Excel, визначено значення коефіцієнтів регресії, які вказано в табл. 9. В табл. 8 також наведено значення різниці $\delta_{t,T,cal}$, розраховані за рівнянням (5) із використанням отриманих коефіцієнтів регресії, і значення відносного відхилу $\Delta\delta_{t,cal}$ між різницями $\delta_{t,T,cal}$ та $\delta_{t,T}$, який визначали за такою формулою:

$$\Delta\delta_{t,cal} = 100(\delta_{t,T,cal} - \delta_{t,T})/\delta_{t,T}. \quad (6)$$

Таблиця 8 – Дані для розрахунку коефіцієнтів регресії

Різниця $\delta_{t,T}$, %	Відхил d_e , %	Проміжок часу $t_{fr,T}$, хв	Розрахункове значення різниці $\delta_{t,T,cal}$, %	Відносний відхил між різницями $\Delta\delta_{t,cal}$, %
0	0	30	0,91	–
0	0	90	0,65	–
0	0	240	–0,02	–
14,70	–10,16	34,41	13,59	–7,59
5,79	–5,09	95,21	6,53	12,8
3,41	–3,35	248,18	3,09	–9,40
–13,74	12,10	25,88	–14,34	4,37
–5,48	5,45	85,07	–5,74	4,73
–3,28	3,42	232,13	–3,27	–0,41

Таблиця 9 – Результати розрахунку коефіцієнтів регресії

a_0	a_1	a_2	a_3
1,042	–1,300	0,001460	–0,004405

Із аналізу табл. 8 випливає, що відносний відхил $\Delta\delta_{t,cal}$ змінюється від –9,40% до 12,8%, а його середнє значення

складає 0,75%, що свідчить про задовільну збіжність даних щодо різниці $\delta_{t,T,cal}$, розрахованих за рівнянням (5), з даними

$\delta_{t,T}$, отриманими із застосуванням методу обчислювального експерименту.

Взаємозв'язок між різницею $\delta_{t,T}$ і проміжками часу ($t_{fr,T}$ і t_{fr}), отриманими за фактичного та номінального температурними режимами в печі, визначається за такою формулою:

$$\delta_{t,T} = 100(t_{fr,T} - t_{fr})/t_{fr} . \quad (7)$$

За даними щодо температури сталі та фактичної температури в печі, отриманими під час випробування, можна визначити проміжок часу $t_{fr,T}$ до досягнення критичної температури 500 °С, відхил d_e (за формулою (4)) і різницю $\delta_{t,T}$ (за формулою (5)). Для визначення значення проміжку часу до досягнення критичної температури 500 °С, яке б було за номінального температурного режиму в печі, необхідно провести коригування отриманого під час випробування проміжку часу $t_{fr,T}$. Коригований проміжок часу $t_{fr,c}$ визначають за формулою (8), яку отримано за допомогою алгебраїчного перетворення формули (7) і враховуючи те, що коригований проміжок часу $t_{fr,c}$ має бути максимально наближений до проміжку часу t_{fr} до досягнення критичної температури 500 °С за номінального температурного режиму.

$$t_{fr,c} = t_{fr,T}/(1 + \delta_{t,T}/100) . \quad (8)$$

За оцінювання точності розрахунків за цією формулою, із застосуванням даних щодо проміжку часу $t_{fr,Tmin}$ і $t_{fr,Tmax}$, наведених в табл. 3, 4 (як проміжку часу $t_{fr,T}$ в рівнянні (5) і формулі (8)), рівняння (5) і табл. 9 визначено дані щодо коригованого проміжку часу $t_{fr,c}$ для номінального температурного режиму і дані щодо різниці ($\delta_{t,c,Tmin}$ і $\delta_{t,c,Tmax}$) між коригованими і номінальними значеннями ($t_{fr,min} = 30$ хв; $t_{fr,med} = 90$ хв; $t_{fr,max} = 240$ хв) проміжків часу. Результати цих розрахунків наведено в табл. 10–13. У табл. 10, 11 $t_{fr,min,Tmin}$, $t_{fr,med,Tmin}$, $t_{fr,max,Tmin}$, $t_{fr,min,Tmax}$, $t_{fr,med,Tmax}$, $t_{fr,max,Tmax}$ – це значення проміжку часу, які відповідають $t_{fr,Tmin}$ і $t_{fr,Tmax}$, наведеним у табл. 3, 4.

Таблиця 10– Результати розрахунку коригованого проміжку часу $t_{fr,c}$, отримані за даними щодо проміжку часу $t_{fr,Tmin}$

$c_p \rho_p$, МДж/ (м ³ ·°С)	λ_p , Вт/(м·°С)	Коригований проміжок часу $t_{fr,c}$ (у хв) для:		
		$t_{fr,min,Tmin}$	$t_{fr,med,Tmin}$	$t_{fr,max,Tmin}$
0,1	0,02	30,29	89,36	241,16
0,5	0,02	30,29	89,27	240,66
1,0	0,02	30,20	89,27	240,66
0,1	0,2	30,20	89,27	240,66
0,5	0,2	30,29	89,27	240,46
1,0	0,2	30,20	89,27	240,56
0,1	2,0	30,20	89,65	240,66
0,5	2,0	30,46	89,55	240,46
1,0	2,0	30,55	89,46	241,36

Таблиця 11 – Результати розрахунку коригованого проміжку часу $t_{fr,c}$, отримані за даними щодо проміжку часу $t_{fr,Tmax}$

$c_p \rho_p$, МДж/ (м ³ ·°С)	λ_p , Вт/(м·°С)	Коригований проміжок часу $t_{fr,c}$ (у хв) для:		
		$t_{fr,min,Tmax}$	$t_{fr,med,Tmax}$	$t_{fr,max,Tmax}$
0,1	0,02	30,35	90,28	238,91
0,5	0,02	30,35	90,28	239,01
1,0	0,02	30,24	90,28	239,63
0,1	0,2	30,24	90,28	240,04
0,5	0,2	30,35	90,39	240,14
1,0	0,2	30,12	90,28	240,66
0,1	2,0	30,12	90,28	240,56
0,5	2,0	30,12	90,28	240,04
1,0	2,0	30,00	89,86	240,76

Таблиця 12 – Результати розрахунку різниці $\delta_{t,c,Tmin}$ між коригованими і номінальними значеннями проміжку часу

$c_p \rho_p$, МДж/ (м ³ ·°С)	λ_p , Вт/(м·°С)	Різниця $\delta_{t,c,Tmin}$ (у %) для:		
		$t_{fr,min}$	$t_{fr,med}$	$t_{fr,max}$
0,1	0,02	0,95	–0,71	0,48
0,5	0,02	0,95	–0,81	0,28
1,0	0,02	0,66	–0,81	0,28
0,1	0,2	0,66	–0,81	0,28
0,5	0,2	0,95	–0,81	0,19
1,0	0,2	0,66	–0,81	0,23
0,1	2,0	0,66	–0,39	0,28
0,5	2,0	1,54	–0,50	0,19
1,0	2,0	1,84	–0,60	0,57

Таблиця 13 – Результати розрахунку різниці $\delta_{t,c,Tmax}$ між коригованими і номінальними значеннями проміжку часу

$c_p \rho_p$, МДж/ (м ³ ·°C)	λ_p , Вт/(м·°C)	Різниця $\delta_{t,c,Tmax}$ (у %) для:		
		$t_{fr,min}$	$t_{fr,med}$	$t_{fr,max}$
0,1	0,02	1,17	0,31	-0,46
0,5	0,02	1,17	0,31	-0,41
1,0	0,02	0,79	0,31	-0,16
0,1	0,2	0,79	0,31	0,02
0,5	0,2	1,17	0,43	0,06
1,0	0,2	0,40	0,31	0,28
0,1	2,0	0,40	0,31	0,23
0,5	2,0	0,40	0,31	0,02
1,0	2,0	0,01	-0,16	0,32

Із аналізу даних, наведених у табл. 12, 13, випливає, що значення різниці між коригованими і номінальними значеннями проміжку часу змінюється: від -0,70% до 0,98% – для $t_{fr,Tmin}$ і від -0,01% до 0,70% – для $t_{fr,Tmax}$. Середні значення різниць $\delta_{t,c,Tmin}$ і $\delta_{t,c,Tmax}$ становлять 0,20% і 0,32% відповідно, а їхні стандартні відхили (S_{Tmin} , S_{Tmax}) – 0,75% і 0,42%, відповідно для $\delta_{t,c,Tmin}$ і $\delta_{t,c,Tmax}$. Зазначені розрахункові дані свідчать про те, що коригування проміжку часу до досягнення критичної температури 500 °C, виконане із

застосуванням формули (8), призвело до суттєвого наближення результатів визначення проміжку часу до досягнення критичної температури 500 °C, отриманих за фактичних мінімально і максимально допустимих температурних режимів в печі (T_{min} і T_{max}), до значень цього проміжку часу за номінального температурного режиму T_s .

На відміну від національного ДСТУ Б В.1.1-4 [6], європейський стандарт EN 1363-1 [5] регламентує не значення допустимого відхилю d_{lim} температури в печі від її номінального значення T_s і відповідні допустимі мінімальні та максимальні температури в печі (T_{min} і T_{max}), а встановлює допустимий відносний відхил $d_{e,lim,e}$ ($d_{e,min,e}$ і $d_{e,max,e}$) площі під кривою фактичної температури в печі $T_i(t)$ від площі під кривою номінального температурного режиму $T_s(t)$. Слід зауважити, що значення допустимого відхилю $d_{e,lim,e}$, також як і d_{lim} , залежить від проміжку часу t від початку вогневого впливу, і його визначають за такими ж залежностями, як і для d_{lim} .

Однак допустимі температури в печі (табл. 1, T_{min} і T_{max}), які розраховано за формулою (1) із застосуванням допустимого відхилю d_{lim} , відрізняються від значень (табл. 1, $T_{min,e}$ і $T_{max,e}$), які визначено за формулою (9) із застосуванням допустимого відхилю $d_{e,lim,e}$.

$$T_{i,min(max),e} = 2(A_{si}(1 + d_{e,lim,e}/100) - A_{i-1,min(max)})/(t_i - t_{i-1}) - T_{i-1,min(max),e}, \quad (9)$$

де $T_{i,min(max),e}$ – значення температури в печі за мінімально або максимально допустимого температурного режиму в печі ($T_{min,e}(t)$ або $T_{max,e}(t)$) для проміжку часу вогневого впливу t_i , °C;

$T_{i-1,min(max),e}$ – значення температури в печі за мінімально або максимально допустимого температурного режиму в печі ($T_{min,e}(t)$ або $T_{max,e}(t)$) для проміжку часу вогневого впливу t_{i-1} , °C;

A_{si} – площа під кривою номінального температурного режиму $T_s(t)$ для проміжку часу вогневого впливу t_i , °C·хв;

$A_{i-1,min(max)}$ – площа під кривою мінімально або максимально допустимого температурного режиму в печі ($T_{min,e}(t)$ або $T_{max,e}(t)$) для проміжку часу вогневого впливу t_{i-1} , °C·хв;

$d_{e,lim,e}$ – допустимий відхил площі під кривою мінімально або максимально допустимого температурного режиму в печі ($T_{min,e}(t)$ або $T_{max,e}(t)$) від площі під кривою номінального температурного режиму $T_s(t)$, %, який становить від -2,5% до -15,0% для мінімально допустимого режиму ($d_{e,min,e}$, табл. 1) і від 2,5% до 15,0% для максимально допустимого режиму ($d_{e,max,e}$, табл. 1);

t_i , t_{i-1} – проміжки часу вогневого впливу, хв.

На рис. 3 наведено залежності температури в печі ($T_{min,e}(t)$ та $T_{max,e}(t)$) для мінімально та максимально допустимих температурних режимів від проміжку часу вогневого впливу, які побудовано за даними, отриманими за формулою (9). Із аналізу цих даних випливає, що на відміну

від $T_{min}(t)$ та $T_{max}(t)$ не для всього проміжку часу вогневого впливу, що розглядається ($0 < t \leq 240$ хв), для мінімально допустимого температурного режиму значення температури $T_{min,e}$ менші за T_s , а для максимально допустимого температурного режиму значення температури $T_{max,e}$ більші за T_s . Для інтервалів проміжку часу від 22 хв до 30 хв і від 49 хв до 60 хв значення температури $T_{min,e}$ більші за T_s , а значення температури $T_{max,e}$ менші за T_s .

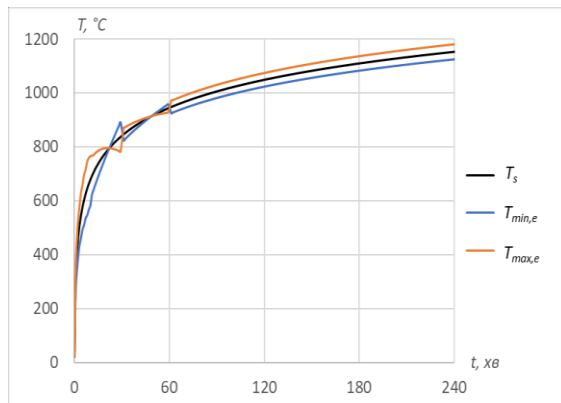


Рисунок 3 – Залежності температури в печі для мінімально та максимально допустимих температурних режимів від проміжку часу вогневого впливу за EN 1363-1 [5]

За даними щодо температур $T_{min,e}$ і $T_{max,e}$, наведеними в табл. 1, через розв'язання прямої задачі теплопровідності із застосуванням даних щодо товщини $d_{p,min}$ (табл. 2) визначали відповідні проміжки часу ($t_{fr,Tmin,e}$ та $t_{fr,Tmax,e}$) до досягнення критичної температури 500 °C. Встановлено, що проміжок часу вогневого впливу до досягнення критичної температури 500 °C ($t_{fr,Tmin,e}$ або $t_{fr,Tmax,e}$) змінюється від 31,4 хв до 246,6 хв і від 27,6 хв до 235,2 хв, відповідно для мінімально та максимально допустимих температурних режимів у печі ($T_{min,e}$ і $T_{max,e}$), наведених у табл. 1. Середні значення цих проміжків часу – 31,54 хв; 92,03 хв; 245,92 хв – для $t_{fr,Tmin,e}$, і 28,03 хв; 88,01 хв; 234,22 хв – для $t_{fr,Tmax,e}$. Відносні стандартні відхили становлять: 0,41 %; 0,15 %; 0,14 % – для $100S_{Tmin,e}/t_{fr,Tmin,e}$, і 0,92 %; 0,16 %; 0,31 % – для $100S_{Tmax,e}/t_{fr,Tmax,e}$. Такі малі величини

відносних відхилів свідчать про несуттєвий вплив коефіцієнта теплопровідності й питомої об'ємної теплоємності вогнезахисного покриття на проміжки часу до досягнення критичної температури 500 °C.

За формулами, аналогічними (3) і (4), визначали дані щодо різниці між значенням проміжку часу до досягнення критичної температури 500 °C ($t_{fr,Tmin,e}$ або $t_{fr,Tmax,e}$), отриманим за умови, що температура в печі дорівнює $T_{min,e}$ або $T_{max,e}$ (табл. 1), і значенням цього ж проміжку часу t_{fr} ($t_{fr,min} = 30$ хв; $t_{fr,med} = 90$ хв; $t_{fr,max} = 240$ хв) за номінального температурного режиму T_s (табл. 1). Результати цих розрахунків наведено в табл. 14, 15.

Таблиця 14 – Результати розрахунку різниці $\delta_{t,Tmin,e}$

$c_p \rho_p$, МДж/ (м ³ ·°C)	λ_p , Вт/(м·°C)	Різниця $\delta_{t,Tmin,e}$ (у %) для:		
		$t_{fr,min}$	$t_{fr,med}$	$t_{fr,max}$
0,1	0,02	5,00	2,44	2,75
0,5	0,02	5,00	2,44	2,46
1,0	0,02	4,67	2,33	2,54
0,1	0,2	4,67	2,33	2,46
0,5	0,2	5,33	2,22	2,33
1,0	0,2	5,00	2,11	2,42
0,1	2,0	5,00	2,11	2,42
0,5	2,0	5,67	2,33	2,25
1,0	2,0	6,00	2,00	2,58

Таблиця 15 – Результати розрахунку різниці $\delta_{t,Tmax,e}$

$c_p \rho_p$, МДж/ (м ³ ·°C)	λ_p , Вт/(м·°C)	Різниця $\delta_{t,Tmax,e}$ (у %) для:		
		$t_{fr,min}$	$t_{fr,med}$	$t_{fr,max}$
0,1	0,02	-5,67	-2,33	-2,79
0,5	0,02	-5,67	-2,33	-2,88
1,0	0,02	-6,00	-2,33	-2,54
0,1	0,2	-6,00	-2,33	-2,58
0,5	0,2	-6,00	-2,00	-2,33
1,0	0,2	-7,00	-2,11	-2,17
0,1	2,0	-7,00	-2,11	-2,17
0,5	2,0	-7,67	-2,00	-2,21

Із аналізу даних, наведених у табл. 14, 15, випливає, що значення різниць $\delta_{t,Tmin,e}$ і $\delta_{t,Tmax,e}$ змінюється від 2,00% до 6,00% і від -2,00% до -7,67% відповідно. Кореляції між цими різницями,

коефіцієнтом теплопровідності λ_p і питомою об'ємною теплоємністю $c_p \rho_p$ вогнезахисного покриття не спостерігається. Існує їхня залежність від проміжку часу t_{fr} , яку наведено на рис. 1. Спостерігається суттєве зменшення величини різниць $\delta_{t,Tmin,e}$ і $\delta_{t,Tmax,e}$ з підвищенням проміжку часу t_{fr} від 30 хв до 120 хв і її подальше незначне збільшення. Цю графічну залежність побудовано за даними щодо середніх значень, які мають різниці $\delta_{t,Tmin,e}$ і $\delta_{t,Tmax,e}$ для проміжків часу $t_{fr,min}$, $t_{fr,med}$, $t_{fr,max}$. Ці середні значення становлять: 5,15%; 2,26%; 2,47% хв – для $\delta_{t,Tmin,e}$, і –6,56%; –2,21%; –2,41% – для $\delta_{t,Tmax,e}$. Стандартні відхили ($S_{Tmin,e}$, $S_{Tmax,e}$) від середніх значень різниць $\delta_{t,Tmin,e}$ і $\delta_{t,Tmax,e}$ становлять: 0,44%; 0,16%; 0,15% – для $t_{fr,Tmin,e}$, і 0,88%; 0,15%; 0,30% – для $t_{fr,Tmax,e}$.

Із порівняння даних щодо різниць $\delta_{t,Tmin,e}$ і $\delta_{t,Tmax,e}$ зі значеннями різниць $\delta_{t,Tmin}$ і $\delta_{t,Tmax}$ (рис. 1) випливає, що максимальна величина відхилу фактичного від номінального проміжку часу до досягнення температури сталі 500 °C для мінімально та максимально допустимих температурних режимів у печі за EN 1363-1 [5] менша, ніж для допустимих температурних режимів за ДСТУ Б В.1.1-4 [6]. Найбільша різниця між цими відхилами спостерігається для малих

значень проміжку часу вогневого впливу t_{fr} , а з його підвищенням ця різниця зменшується. Зокрема, для мінімально допустимого температурного режиму за EN 1363-1 [5] і $t_{fr,min} = 30$ хв різниця $\delta_{t,T}$ на 65% менша, ніж для такого ж режиму за ДСТУ Б В.1.1-4 [6], а для $t_{fr,max} = 240$ хв – менша на 28%.

У табл. 16 наведено вихідні розрахункові дані і результати коригування, проведеного із застосуванням рівняння (8) для фактичних значень проміжку часу до досягнення температури сталі 500 °C ($t_{fr,Tmin,e}$ і $t_{fr,Tmax,e}$), отриманих для мінімально та максимально допустимих температурних режимів за EN 1363-1 [5]. Наведені в цій таблиці дані свідчать про те, що проведене коригування призвело до суттєвого наближення результатів визначення проміжку часу до досягнення критичної температури 500 °C, отриманих за фактичних мінімально і максимально допустимих температурних режимів у печі ($T_{min,e}$ і $T_{max,e}$), до значень цього проміжку часу t_{fr} за номінального температурного режиму T_s . Величина різниці (Δ_t) між коригованими і номінальними значеннями цього проміжку часу не перевищує 1,9%, що є прийнятним для інженерних розрахунків.

Таблиця 16 – Результати коригування даних щодо проміжку часу $t_{fr,T}$

Фактичний проміжок часу $t_{fr,T}$, хв	Відхил d_e , %	Коригований проміжок часу $t_{fr,c}$, хв	Номінальний проміжок часу t_{fr} , хв	Відносна різниця Δ_t , %
31,54	–5,00	29,43	30	–1,90
92,03	–2,50	88,87	90	–1,25
245,92	–2,50	240,37	240	0,15
28,03	5,99	30,02	30	0,05
88,01	2,50	90,06	90	0,06
234,22	2,50	239,94	240	–0,02

За отриманими для мінімально та максимально допустимих температурних режимів в печі за EN 1363-1 [5] і ДСТУ Б В.1.1-4 [6] розрахунковими даними щодо різниць $\delta_{t,Tmin}$ і $\delta_{t,Tmax}$, $\delta_{t,Tmin,e}$ і $\delta_{t,Tmax,e}$ побудовано графічну залежність (рис. 4) різниці $\delta_{t,T}$ (за модулем) між фактичним

проміжком часу до досягнення критичної температури 500 °C і його номінальним значенням від відхилу d_e (за модулем). Для побудови цієї залежності для певних проміжків часу брали середні значення відхилу $|d_e|$, наприклад, $0,5(|d_{e,min}| + |d_{e,max}|)$, і середні значення різниці $|\delta_{t,T}|$, наприклад,

$0,5(|\delta_{t,Tmin}| + |\delta_{t,Tmax}|)$. Зокрема, для проміжку часу 30 хв середнє значення відхилю $|d_e|$ становить 11,13% ($0,5(|-11,13| + |11,13|)$) (дані з табл. 1), а середнє значення різниці $|\delta_{t,T}|$ дорівнює 14,22% ($0,5(|14,70| + |-13,74|)$) (дані з табл. 7). Із рис. 4 випливає, що ця залежність монотонно зростає, її можна описати такою формулою:

$$|\delta_{t,T}| = 0,0374d_e^2 + 0,8617|d_e|. \quad (10)$$

Цю формулу можна застосовувати для інженерних розрахунків з метою оцінювання різниці між фактичним проміжком часу до досягнення критичної температури 500 °С, отриманим під час випробування, і його значенням за номінального температурного режиму. Під час користування формулою (10) необхідно враховувати, що для від'ємних значень відхилю d_e різниця $\delta_{t,T}$ більше нуля, а для додатних значень d_e – ця різниця менше нуля.

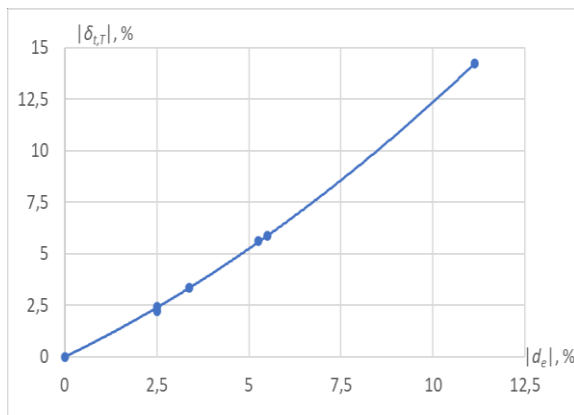


Рисунок 4 – Залежність різниці $\delta_{t,T}$ (за модулем) від величини відхилю d_e (за модулем)

Слід зауважити, що результати, отримані в межах цього дослідження, можуть вважатися за доцільні з практичного погляду, тому що дають змогу обґрунтовано підходити до оцінювання проміжку часу до настання граничного стану за ознакою втрати несучої здатності таких сталевих конструкцій, як балки і колони з одношаровою системою вогнезахисту. З погляду теорії, вони дають змогу стверджувати про визначеність впливу

відхилю фактичної температури в печі від номінального режиму на проміжок часу до настання граничного стану цих конструкцій за ознакою втрати несучої здатності та процедури коригування отриманих показників щодо цього проміжку часу для усунення впливу зазначеного відхилю температури на результати випробування, що є певними перевагами проведеного дослідження. Однак варто зазначити, що результати дослідження отримано для вогнезахисного покриття, що має сталі, незалежні від температури, значення коефіцієнта теплопровідності і питомої теплоємності. Насправді значення цих теплофізичних властивостей для пасивних і реактивних вогнезахисних матеріалів залежать від низки параметрів, зокрема від температури [18–19]. Крім того, результати дослідження отримано тільки для стандартного температурного режиму, одношарової системи вогнезахисту і критичної температури 500 °С. Зазначене може призвести до наявності відмінностей в отриманих результатах стосовно залежності різниці між показниками щодо проміжку часу до настання граничного стану за ознакою втрати несучої здатності, отриманими за різним відхилюм фактичної температури в печі від номінального режиму. Така невизначеність накладає певні обмеження на використання отриманих результатів, що може трактуватися, як недоліки цього дослідження. Неможливість зняти вказані обмеження в цьому дослідженні зумовлює потенційно цікавий напрям подальших розвідок. Вони, зокрема, можуть бути орієнтовані на виявлення залежностей між проміжком часу до настання граничного стану за ознакою втрати несучої здатності сталевих конструкцій, оснащених одно- і багатошаровими системами вогнезахисту, в яких застосовують вогнезахисні покриття зі змінними теплофізичними властивостями, відхилюм фактичної температури в печі від номінального режиму і значенням критичної температури для різних номінальних температурних режимів пожежі [15; 20].

Зазначене дасть змогу підвищити точність оцінювання вогнестійкості таких сталевих конструкцій, як балки і колони, за різних умов випробування на вогнестійкість.

Висновки та напрями подальших досліджень. Під час проведення дослідження виявлено закономірності щодо впливу відхилення фактичної температури в печі від номінального режиму на результати випробування таких сталевих конструкцій, як балки і колони з одношаровою системою вогнезахисту, в умовах стандартного температурного режиму за EN 1363-1 і ДСТУ Б В.1.1-4.

Встановлено, що різниця між значеннями проміжку часу до досягнення на металевій поверхні сталеві конструкції з одношаровою системою вогнезахисту критичної температури 500 °С, отриманими за фактичним і номінальним температурними режимами в печі, залежить від проміжку часу вогневого впливу і показника відхилення між цими режимами, і не залежить від теплофізичних властивостей вогнезахисного покриття. Найбільші величини цієї різниці є різними для допустимих відхилів, регламентованих у національному і європейському стандартах

ДСТУ Б В.1.1-4 і EN 1363-1. Для умов національного стандарту з підвищенням проміжку часу вогневого впливу від 30 хв до 240 хв величина цієї різниці зменшується від 14,7% до 3,3%, а для європейського стандарту – від 6,6% до 2,4%.

Визначено процедуру коригування отриманих під час випробування показників щодо проміжку часу до настання граничного стану сталеві конструкції з одношаровою системою вогнезахисту за ознакою втрати несучої здатності, яка дає змогу усунути вплив відхилення фактичного температурного режиму в печі від номінального на результати випробування.

Окреслено напрями подальших досліджень, які орієнтовані на виявлення залежностей між проміжком часу до настання граничного стану за ознакою втрати несучої здатності сталевих конструкцій, оснащених одно- і багатошаровими системами вогнезахисту, в яких застосовують вогнезахисні покриття зі змінними теплофізичними властивостями, відхиленням фактичної температури в печі від номінального режиму і значенням критичної температури для різних номінальних температурних режимів пожежі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. EN 1365-3:1999. Fire resistance tests for loadbearing elements. Part 3 : Beams. European committee for standardization. Central Secretariat : rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 1999 CEN. 14 p.
2. ДСТУ Б В.1.1-13:2007 Захист від пожежі. Балки. Метод випробування на вогнестійкість (EN 1365-3:1999, NEQ). Київ : Мінрегіонбуд України, 2007. 6 с.
3. EN 1365-4:1999. Fire resistance tests for loadbearing elements – Part 4 : Columns. European committee for standardization. Central Secretariat : rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 1999 CEN. 11 p.
4. ДСТУ Б В.1.1-14:2007 Захист від пожежі. Колони. Метод випробування на вогнестійкість (EN 1365-4:1999, NEQ). Київ : Мінрегіонбуд України, 2007. 8 с.
5. EN 1363-1:2020. Fire resistance tests. Part 1 : General Requirements. European committee for standardization. Management Centre : Rue de la Science 23, B-1040 Brussels. 2020 CEN. 54 p.
6. ДСТУ Б В.1.1-4-98* Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги. Київ : Держбуд України, 2005. 19 с.
7. Wickström U., Hunt S., Lattimer B., Barnett J., Beyler C. Technical comment : ten fundamental principles on defining and expressing thermal exposure as boundary conditions in fire safety engineering. *Fire and Materials*. 2018. Vol. 42(8). P. 985–988.
8. Piloto P.A.G., Mesquita L.M.R., Pereira Alexandre. Thermal analysis in fire-resistance Furnace. *In International Workshop on Fire Protection and Life Safety in Buildings and Transportation Systems*. 2009. Santander. Spain.
9. Gordon M. E. Cooke. Can Harmonisation of Fire Resistance Furnaces be Achieved by Plate Thermometer Control? *Fire Research Station Borehamwood, Herts WD6 2BL. UK Fire safety science – Proceedings of the fourth international symposium*. 1994. P. 1195–1207.
10. Babrauskas V., Williamson R. B., Temperature Measurement in Fire Test Furnaces. *Fire Technology*. 1978. Vol. 14. P. 226–239.
11. Sultan M. A. Fire Resistance Furnace Temperature Measurements : Plate Thermometers vs. Shielded Thermocouples. *Fire Technology*. 2006. Vol. 42. P. 253–267.
12. Sultan M. A. Comparisons of Temperature and Heat Flux in Furnaces Controlled by Different Types of Temperature Sensors. *Journal of ASTM International*. 2010. Vol. 7(1). P. 44–62.
13. Новак С., Добрян О., Пустовий М. Вплив температурного режиму пожежі на проміжок часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій. *Науковий вісник : Цивільний захист та пожежна безпека*. 2023. № 1(15). С. 18–31.

14. ISO 834-1:1999. Fire-resistance tests – Elements of building construction. Part 1 : General requirements. International organization for standardization. 1999. 25 p.
15. EN 1991-1-2:2002/AC:2013. Eurocode 1: Actions on structures. Part 1–2 : General actions – Actions on structures exposed to fire. European committee for standardization. Central secretariat : rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2004 CEN. 61 p.
16. ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016. Проектування сталевих конструкцій. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість. Київ : Мінрегіон України, 2016. 111 с.
17. Новак С., Дрідж В., Добростан О., Новак М. Вплив теплофізичних властивостей вогнезахисних матеріалів на тепловий стан сталевих колон за стандартного температурного режиму. *Науковий вісник : Цивільний захист та пожежна безпека*. 2022. № 1(13). С. 88–110.
18. Круковский П., Новак С., Поклонский В., Еременко С., Фролов Г. *Оценка огнестойкости металлических строительных конструкций и огнезащитной способности покрытий (расчетно-экспериментальный подход)* : коллективная монография. Киев : Франко Пак. 2021. 148 с.
19. Chao Zhang, Adam Pintar, Jonathan M. Weigand, Joseph A. Main, Fahim Sadek. Impact of variability in thermal properties of SFRM on steel temperatures in fire. *Fire Safety Journal*. 2021. Vol. 123. P. 103361. doi:10.1016/j.firesaf.2021.103361.
20. EN 1363-2:1999. Fire resistance tests. Part 2 : Alternative and additional procedures. European committee for standardization. Central Secretariat : rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 1999 CEN. 16 p.

REFERENCES

1. EN 1365-3:1999. Fire resistance tests for loadbearing elements. Part 3: Beams. European committee for standardization. Central Secretariat: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 1999 CEN. 14 p. [in English].
2. DSTU B V.1.1-13:2007 Zakhyst vid pozhezh. Balky. Metod vyprobuвання na vohnestiiikist (EN 1365-3:1999, NEQ). [Fire protection. Beams. Fire resistance test method]. Kyiv : Minrehionbud Ukrainy, 2007. 6 s. [in Ukrainian].
3. EN 1365-4:1999. Fire resistance tests for loadbearing elements – Part 4: Columns. European committee for standardization. Central Secretariat: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 1999 CEN. 11 p. [in English].
4. DSTU B V.1.1-14:2007 Zakhyst vid pozhezh. Kolony. Metod vyprobuвання na vohnestiiikist (EN 1365-4:1999, NEQ). [Fire protection. Columns. Fire resistance test method]. Kyiv : Minrehionbud Ukrainy, 2007. 8 s. [in Ukrainian].
5. EN 1363-1:2020. Fire resistance tests – Part 1: General Requirements. European committee for standardization. Management Centre: Rue de la Science 23, B-1040 Brussels. 2020 CEN. 54 p. [in English].
6. DSTU B V.1.1-4-98*. Zakhyst vid pozhezh. Budivelni konstruktzii. Metody vyprobuвання na vohnestiiikist. Zahalni vymohy. [Fire protection. Building constructions. Test methods for firefighters. General requirement]. Kyiv: Derzhbud Ukrainy, 2005. 19 s. [in Ukrainian].
7. Wickström, U., Hunt, S., Lattimer, B., Barnett, J., Beyler, C. Technical comment: ten fundamental principles on defining and expressing thermal exposure as boundary conditions in fire safety engineering. *Fire and Materials*. 2018. Vol. 42(8). P. 985–988. [in English].
8. Piloto, P.A.G., Mesquita, L.M.R., Pereira, Alexandre. Thermal analysis in fire-resistance Furnace. In International Workshop on Fire Protection and Life Safety in Buildings and Transportation Systems. 2009. Santander. Spain. [in English].
9. Gordon, M. E. Cooke. Can Harmonisation of Fire Resistance Furnaces be Achieved by Plate Thermometer Control? Fire Research Station Borehamwood, Herts WD6 2BL. UK Fire safety science – Proceedings of the fourth international symposium. 1994. P. 1195–1207. [in English].
10. Babrauskas, V., Williamson, R. B., Temperature Measurement in Fire Test Furnaces. *Fire Technology*. 1978. Vol. 14. P. 226–239. [in English].
11. Sultan M. A. Fire Resistance Furnace Temperature Measurements : Plate Thermometers vs. Shielded Thermocouples. *Fire Technology*. 2006. Vol. 42. P. 253–267.
12. Sultan, M. A. Comparisons of Temperature and Heat Flux in Furnaces Controlled by Different Types of Temperature Sensors. *Journal of ASTM International*. 2010. Vol. 7(1). P. 44–62. [in English].
13. Novak, S., Dobrostan, O., Pustovy, M. Vplyv temperaturnoho rezhymu na promizhok chasu zberezhenosti vohnestiiikosti stalevykh konstruktzii. [The influence of the temperature regime of the fire on the time interval of preservation of fire resistance of steel structures]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*. 2023. № 1(15). S. 18–31. [in Ukrainian].
14. ISO 834-1:1999. Fire-resistance tests – Elements of building construction. Part 1: General requirements. International organization for standardization. 1999. 25 p. [in English].
15. EN 1991-1-2:2002/AC:2013. Eurocode 1: Actions on structures – Part 1–2: General actions – Actions on structures exposed to fire. European committee for standardization. Central secretariat: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2004 CEN. 61 p. [in English].
16. DSTU-N B V.2.6-211:2016. Proektuvannya stalevykh konstruktzii. Rozrakhunok konstruktzii na vohnestiiikist [Design of steel structures. Calculation of structures for fire resistance]. Kyiv: Minrehion Ukrainy. 2016. 61 s. [in Ukrainian].
17. Novak S., Dridzh V., Dobrostan O., Novak M. Vplyv teplofizychnykh vlastyvostei vohnezakhysnykh materialiv na teplovy stan stalevykh kolon za standartnoho temperaturnoho rezhymu [The influence of thermophysical properties of flame retardant materials on the thermal state of steel columns under a standard temperature regime]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*. 2022. № 1(13). S. 88–110. [in Ukrainian].
18. Krukovskij P., Novak S., Poklonskij V., Eremenko S., Frolov G. Ocenka ognestojkosti metallicheskich stroitel'ny'kh konstrukcij i ognезashhitnoj sposobnosti pokry'tij (raschetno-e'ksperimental'ny'j podkhod) [Evaluation of the fire resistance of metal building structures and the fire retardant ability of coatings (computational and experimental approach)]. Kiev: Izdatel'stvo Franko Pak. 2021. 148 s. [in Russian].
19. Chao, Zhang, Adam, Pintar, Jonathan, M. Weigand, Joseph A. „Main, Fahim, Sadek. Impact of variability in thermal properties of SFRM on steel temperatures in fire. *Fire Safety Journal*. 2021. Vol. 123. P. 103361. doi:10.1016/j.firesaf.2021.103361. [in English].
20. EN 1363-2:1999. Fire resistance tests. Part 2: Alternative and additional procedures. European committee for standardization. Central Secretariat: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 1999 CEN. 16 p. [in English].

THE INFLUENCE OF TEMPERATURE DEVIATION IN THE FURNACE FROM THE NOMINAL REGIME ON THE RESULTS OF TESTING STEEL STRUCTURES FOR FIRE RESISTANCE

S. Novak¹, M. Novak², M. Pustovyi³

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

²*The National University of Food Technologies, Ukraine*

³*Cherkasy Institute of Fire Safety named after Heroes of Chornobyl of the National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine*

KEYWORDS: ANNOTATION

fire resistance
limit state,
temperature
deviation,
critical
temperature,
temperature
regime, time
period of fire
exposure, steel
structure,
thermal
properties.

This study is devoted to the evaluation of the time interval until the onset of the limit state of steel structures as a sign of loss of bearing capacity, taking into account the presence of deviation of the actual temperature in the furnace from the nominal regime during their fire resistance test according to national and European standards. The purpose of the study was to identify the dependence between this time interval for such steel structures as beams and columns with a single-layer fire protection system, and the deviation of the actual temperature in the furnace from the nominal regime, as well as to determine the procedure for adjusting the obtained indicators with respect to this time interval to eliminate the influence of the specified deviation temperature on the test results. With the application of the computational experiment method, which is based on solving a direct one-dimensional problem of thermal conductivity, the data on the difference between the values of this time interval, obtained at the minimum and maximum permissible temperatures in the furnace, and the value of this time interval for the nominal temperature regime were determined. Laws have been revealed regarding the influence of the deviation of the actual temperature in the furnace from the nominal regime on the test results of steel structures under the conditions of the standard temperature regime according to EN 1363-1:2020 and DSTU B V.1.1-4-98*. It was established that the difference between the values of the time interval until reaching the critical temperature of 500 °C on the metal surface of a steel structure with a single-layer fire protection system, obtained according to the actual and nominal temperature regimes in the furnace, depends on the time interval of fire exposure and the deviation index between these regimes, and not depends on the thermal properties of the fire protective coating. The largest values of this difference are different for the permissible deviations regulated in national and European standards. For the conditions of the national standard, with an increase in the fire exposure time from 30 min to 240 min, the value of this difference decreases from 14,7% to 3,3%, and for the European standard, it decreases from 6,6% to 2,4%. The procedure for adjusting the indicators obtained during the test regarding the time interval until the onset of the limit state of a steel structure with a single-layer fire protection system based on the loss of load-bearing capacity is determined, which allows to eliminate the influence of the deviation of the actual temperature regime in the furnace from the nominal one on the test results.

УДК 614.841.45

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРОТОЧНОЇ ЧАСТИНИ ЗРОШУВАЧА СИСТЕМ ПОЖЕЖОГАСІННЯ НА ЙОГО ВИТРАТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2.105-112>

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

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

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

Іллюченко П. О., ORCID iD 0000-0001-6687-6388

*E-mail: naanotek@ukr.net

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО АНОТАЦІЮ СТАТТЮ

Надійшла до редакції:
03.10.2023

Пройшла рецензування:
20.10.2023

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

технічна механіка
рідини, зрошувач
систем пожежогасіння,
виртота зрошувача,
гідравлічний опір,
втрата тиску на
проточних елементах,
К-фактор зрошувача,
коефіцієнт місцевого
гідравлічного опору,
турбулентність
водяного потоку.

Проаналізовано проблемні питання, які періодично виникають під час випробувань деяких показників технічних характеристик (за методами та процедурами згідно з ДСТУ EN 12259-1:2019) для окремих партій зразків зрошувачів систем водопінного пожежогасіння, що не мають маркування провідних зарубіжних брендів або мають, але невідомих виробників, імовірно неоригінальних виробів, через які зазвичай ці зразки бракуються. Зокрема, це пов'язано з отриманням незадовільних результатів випробувань щодо такого показника якості виробів, як К-фактор. Для з'ясування причин зазначеного проведено теоретичні дослідження в галузі технічної механіки рідин (гідродинаміки) та попередньо їх виявлено. Подальші дослідження зразків зрошувачів, що не відповідали вимогам вказаного стандарту, підтвердили вплив виявленого недоліку конструкції, ймовірно допущеного під час виготовлення забракованих зрошувачів, на результати випробувань. Встановлено та підтверджено, що причина полягає у дефекті проточної частини зрошувача, а саме – наявності гострої крайки на його вхідному отворі. Після доопрацювання конструкції через видалення гострої крайки виконанням фаски результати повторних гідравлічних випробувань показали, що параметри зрошувача відповідають встановленим нормам. Результати досліджень наведені у матеріалах цієї публікації у графічному вигляді. З огляду на зазначене необхідно у будь-який можливий спосіб, зокрема через цю публікацію, інформувати постачальників та замовників продукції щодо необхідності проведення обов'язкової перевірки. Якщо фаски або плавного закруглення крайки вхідного отвору проточної частини виробів немає, це свідчить про неоригінальність зрошувачів, що може спричинити їх бракування.

Постановка проблеми. За методами та рекомендованими процедурами, наведеними в [1], виконують перевірки та випробування 19 показників якості та одного показника щодо маркування спринклерів (зрошувачів) автоматичних систем пожежогасіння. Під час проведення випробувань зрошувачів різних типорозмірів, що не мають маркування відомих зарубіжних брендів або мають, але невідомих виробників, імовірно неоригінальних виробів, для

окремих партій зразків виникало проблемне питання щодо невідповідності одного з показників якості, К-фактора, вимогам, наведеним в [1]. Зрозуміло, це призводило до бракування таких зразків.

Під час проведення теоретичних розвідок у галузі технічної механіки рідин (гідродинаміки) попередньо виявлено причину зазначеної проблеми, а в процесі подальших експериментальних досліджень зрошувачів підтверджено негативний вплив виявленого недоліку конструкції,

допущеного під час їх розроблення та/або виготовлення, на результати випробувань. Зміст та результати вказаних теоретичних та експериментальних досліджень наведено у цій публікації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Незважаючи на те, що перші спринклерні системи водяного пожежогасіння з'явилися ще наприкінці XIX століття, після того як британець Стюарт Гаррісон у 1864 році винайшов спринклер – зрошувач, роботи щодо їхнього удосконалення, зокрема й самих зрошувачів, тривають і донині. До найкращих брендів світових виробників зрошувачів систем пожежогасіння, що працюють на ринку України, зокрема належать: TYCO, VICTAULIC, RELIABLE (США), VIKING, MINIMAX (Німеччина), RAPIDROP (Великобританія), HD FIRE (Індія) тощо.

Варто зауважити, що з 01.01.2020 р. в Україні чинні два національні стандарти щодо вимог та методів випробувань спринклерів систем пожежогасіння: [1], який є ідентичним відповідному європейському стандарту EN та [2], який є ідентичним відповідному міжнародному стандарту ISO, що набули чинності методом підтвердження згідно з наказом ДП «УкрНДНЦ» за № 405 від 05.12.2019 р. Зміст та положення обох документів здебільшого збігаються (дублюються), але за окремими позиціями відрізняються. Зокрема, у стандарті [2] передбачено вимоги та методи випробувань спринклерів щодо вогневих випробувань, герметичності, замерзання в них води, дії вакууму тощо, яких немає у стандарті [1]. Зазначено також про окремі відмінності трактування деяких норм за текстом документів, зокрема у разі визначення показника, що досліджується у цій публікації, К-фактору; відрізняються діапазони випробувальних тисків тощо. Таким чином, імовірно без проведення детального аналізу змісту та суті цих документів під час ухвалення рішення про їхнє впровадження створена колізія для користувачів щодо розбіжностей у двох формально чинних в Україні нормативних

актах. Окрім цього, аналітичні дослідження виявили ще одну проблему щодо наведеного питання – нині стандарт ISO 6182-1:2014, який в Україні взято за основу наведеного вище стандарту [2], розробником міжнародних стандартів ISO замінений на нову редакцією від 2021 року. Згідно з наведеними у доступних джерелах інформації змістом та обсягом цієї редакції стандарту значно розширені вимоги до характеристик, маркування та методів випробувань для інших типів зрошувачів: спринклерів зі збільшеним покриттям захищеної площі, побутових та складських спринклерів, зокрема спринклерів зі швидким реагуванням (ESFR), спринклерів з електричним активуванням (EAS) і спринклерів із контролюванням активації (SMA). З огляду на це необхідно вивчити питання з метою можливого впровадження цього стандарту в Україні та відміни чинних одночасно стандартів [1–2], що усуне колізію, про яку зазначено вище. Разом із наведеними стандартами в Україні також чинний стандарт [3], в якому регламентовано вимоги до проектування, монтажу та технічного обслуговування автоматичних спринклерних систем пожежогасіння, включаючи зрошувачі. У статті [4] наведені результати досліджень щодо впливу геометричних характеристик зрошувачів і трубопроводів на гідравлічні параметри розподільчої мережі систем водяного пожежогасіння, які показують, що на гідравлічні параметри розподільчої мережі насамперед впливають геометричні параметри зрошувачів, а потім параметри трубопроводів розподільчої мережі та виявлено групи комбінацій геометричних характеристик трубопроводів і зрошувачів із близькими гідравлічними параметрами, урахування яких дає змогу знизити вартість розподільчої мережі. Матеріали аналітичних досліджень у [5] містять, зокрема, інформацію щодо позитивного впливу наявності фаски у вхідному отворі гідравлічних насадок на зменшення коефіцієнта місцевого гідравлічного опору. У підручнику [6] викладено основи

технічної механіки рідини і газу: фізичні властивості рідини, гідростатика, гідродинаміка, гідравлічні опори, втрати напору під час руху рідини тощо, зокрема щодо коефіцієнтів місцевого гідравлічного опору різних форм вхідного отвору проточної частини гідравлічних насадок.

Формулювання цілей дослідження. Метою проведення дослідження є виявлення причин, що призводять до розбіжності гідродинамічних характеристик зразків зрошувачів одного типорозміру від різних виробників (постачальників), отриманих для випробувань, внаслідок яких деякі зрошувачі не проходили випробування та бракувалися.

Методи дослідження. Проведено аналітичні, теоретичні та експериментальні дослідження із наведеної проблеми для деяких типорозмірів зрошувачів від окремих постачальників, що не пройшли випробування згідно з вимогами, наведеними в [1].

Виклад основного матеріалу. Пожежна наука та технічні засоби водопінного пожежогасіння базуються безпосередньо на принципах гідродинаміки, зокрема на застосуванні основних її законів: системи диференційних рівнянь руху в'язкої рідини Нав'є – Стокса, закону нерозривності потоку, рівнянь Бернуллі тощо. Відомо, що зазвичай зрошувачі систем водопінного пожежогасіння за своїм конструктивним виконанням відповідно до основ гідродинаміки [6] являють собою насадки як короткий трубопровід, довжина якого не перевершує 3–4 діаметри отвору його проточної частини. Окрім цього, отвір проточної частини зрошувача виконано конусним, збіжним від входу до виходу, з кутом при вершині осьового перерізу конуса близько 10°–13°. Такі параметри проточної частини зрошувача забезпечують практично плавне протікання рідини без гідравлічних збуджень течії. Водночас отвір проточної частини зрошувача є одним із елементів місцевого гідравлічного опору, що може

мати різні величини коефіцієнта гідравлічного опору ζ , який, зокрема, залежить від швидкості течії рідини, геометричних розмірів і його форми. В той же час втрата тиску на елементі місцевого гідравлічного опору (Δh , м. вод. ст.), що за законами гідродинаміки негативно впливає на витратні характеристики насадки, визначається за відомою формулою Вейсбаха (1):

$$\Delta h = \zeta \times \frac{V^2}{2g}, \quad (1)$$

де ζ – безрозмірний коефіцієнт місцевого гідравлічного опору;

V – середня швидкість течії рідини, м/с;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

$\frac{V^2}{2g}$ – швидкісний напір течії рідини, м

Експериментально встановлено, що для різних форм вхідного отвору проточної частини гідравлічної насадки коефіцієнти місцевого гідравлічного опору ζ мають відповідні значення [6, с. 159]. Наприклад, для вхідного отвору гідравлічної насадки, що має гостру вхідну крайку, цей коефіцієнт складає $\zeta = 0,5$, для отвору з мало закругленою крайкою – $\zeta = 0,2$, а для отвору з плавно закругленою крайкою – $\zeta = 0,04 \div 0,10$, який для розрахунків беруть рівним $\zeta = 0,08$. Водночас встановлено, що траєкторії окремих струминок потоку рідини, що зайшли до отвору з плавно закругленою крайкою після її проходження не піддаються істотній деформації, і їхня форма під час входу в отвір збігається з їхньою формою на виході, тобто турбулентність потоку, що пройшов через такий місцевий опір, не збільшується.

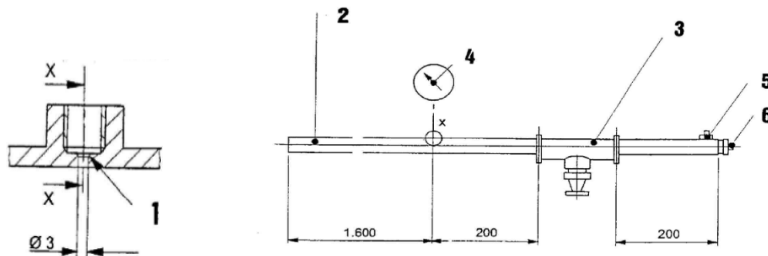
Візуальний огляд виконання проточних частин наданих зрошувачів, що не пройшли випробування з показника К-фактор, показав, що саме на них вхідний отвір має гостру вхідну крайку порівняно зі зрошувачами, які успішно пройшли випробування і мають фаску на вхідному отворі.

Для перевірки наведеної версії на стенді для визначення К-фактора проведено порівняльні гідравлічні

дослідження зразків з гострою крайкою на вхідному отворі проточної частини та зрошувачів після доопрацювання конструкції через видалення гострої

крайки виконанням фаски розміром $1,6 \times 45^\circ$.

Схема стенда для визначення К-фактора зрошувачів згідно з [1] наведена на рис. 1.



1 – штуцер для приєднання засобу вимірювання тиску; 2 – сталевая труба D_y 40 мм; 3 – трійник для приєднання зрошувача; 4 – засіб вимірювання тиску (манометр, датчик тиску); 5 – клапан для випускання повітря; 6 – заглушка

Рисунок 1 – Схема стенда для визначення К-фактора зрошувачів

Джерело: [1, с. 21]

Загальний вигляд зразків двох типорозмірів зрошувачів, з номінальним діаметром отвору 15 мм та 20 мм, що досліджувались, наведено на рис. 2.

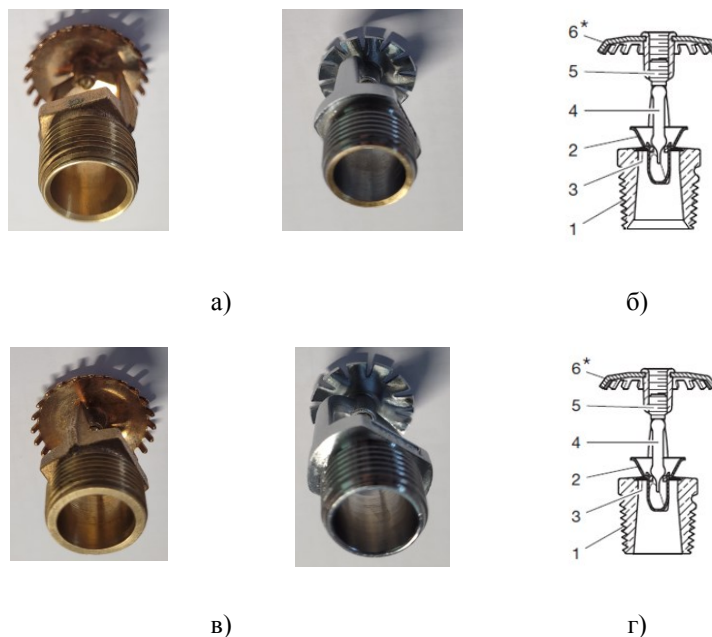


Рисунок 2 – Загальний вигляд зрошувачів з номінальним діаметром отвору 15 мм та 20 мм, що досліджувались: а) – зрошувачі з фаскою на вхідному отворі; б) – зрошувач з фаскою в розрізі: 1 – корпус; 2 – заглушка клапана; 3 – ущільнювач; 4 – термоколба; 5 – гвинт; 6 – розетка; в) – зрошувачі без фаски на вхідному отворі; г) – зрошувач без фаски в розрізі

Джерело: розробка авторів

Робочий момент випробувань зрошувача на випробувальному стенді для визначення К-фактора наведено на рис. 3



Рисунок 3 – Робочий момент випробувань зрошувача на випробувальному стенді для визначення К-фактора

Джерело: розробка авторів

Значення К-фактора зрошувачів згідно з [1] не повинні виходити за допуски, зазначені в табл. 1.

Таблиця 1 – Значення К-фактора для зрошувачів систем пожежогасіння

Номинальний діаметр отвору, мм	К-фактор, (л/хв ⁻¹)·бар ^{-0,5}
10	57 ± 3
15	80 ± 4
20	115 ± 6

Джерело: посилання [1, с. 5]

Випробування проводили згідно з наведеною в [1] методикою. Зрошувачі приєднували до відповідного трійника 3 стенда (див. рис. 3) За допомогою витратоміра стенда (на рисунках не

показано) з похибкою вимірювання витрати ± 2% визначали витрату води через зрошувач у діапазоні від 0,5 бар до 6,5 бар із кроком (1,00 ± 0,02) бар, який контролювали за допомогою датчика тиску 4. Для кожного значення тиску з наведеного інтервалу визначали К-фактор за формулою (3):

$$K = \frac{Q}{\sqrt{P}} \quad (3)$$

де P – тиск, бар;

Q – витрата води через зрошувач, л/хв.

Для наглядного порівняння на рис. 4–5 надано графіки витратних характеристик води та К-фактора зрошувача з номінальним діаметром отвору 15 мм, а на рис. 6–7 –аналогічні дані для зрошувача з номінальним діаметром отвору 20 мм.

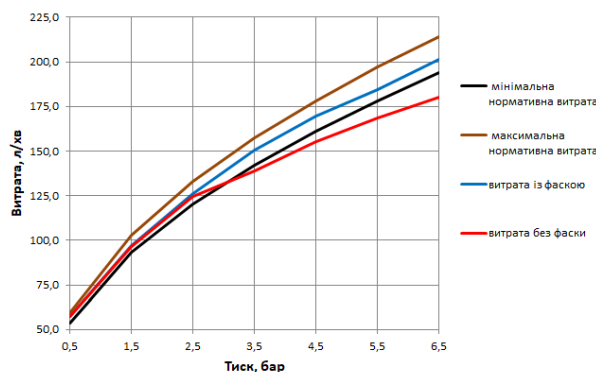


Рисунок 4 – Графіки витратних характеристик зрошувача з номінальним діаметром отвору 15 мм

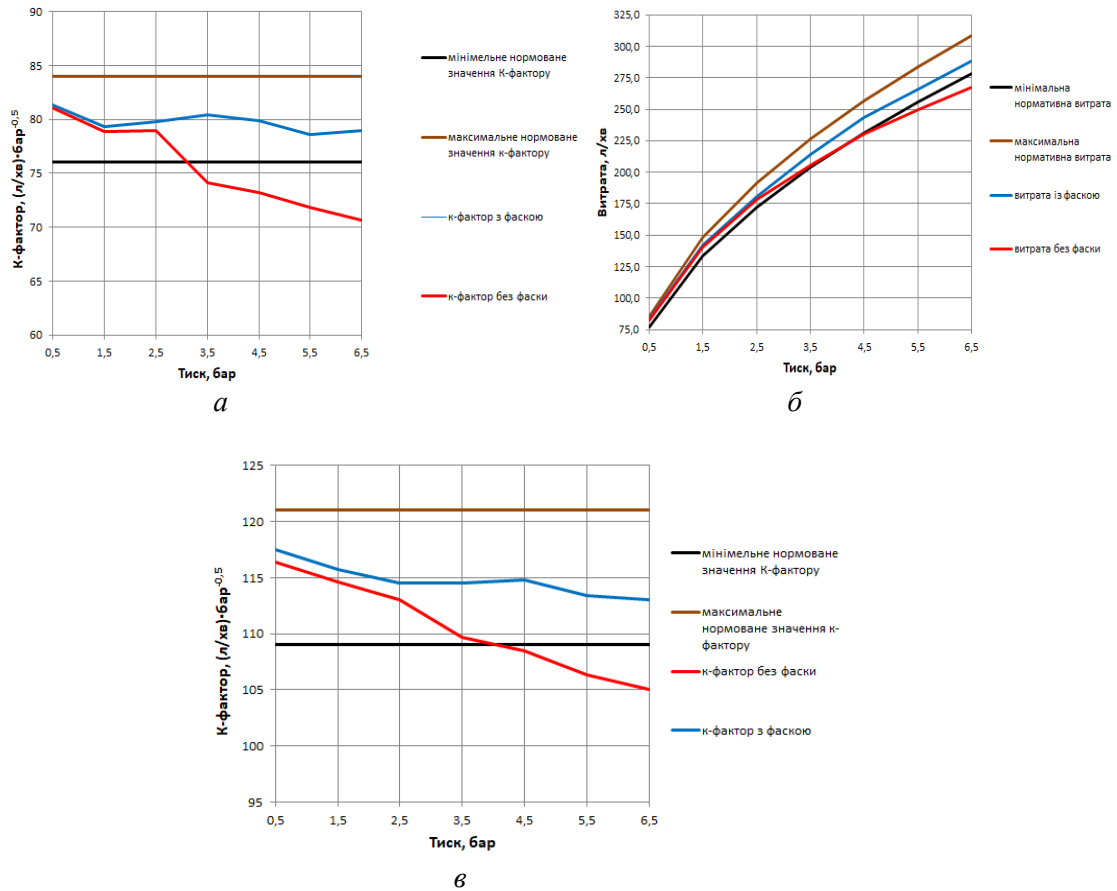


Рисунок 5 – а) графіки К-фактора зрошувача з номінальним діаметром отвору 15 мм; б) графіки витратних характеристик зрошувача з номінальним діаметром отвору 20 мм; в) графіки К-фактора зрошувача з номінальним діаметром отвору 20 мм

Джерело: розробка авторів

Як видно з рис. 4–5, експериментальні значення витрати води та К-фактора для зрошувачів з фаскою не виходять за нормовані межі цих показників. Для зрошувачів без фаски експериментальні значення витрати води та К-фактора виходять за нижню нормовану межу цих показників за тиску води понад 3 бар для зрошувача з номінальним діаметром отвору 15 мм (див. рис. 4–5) та більше 4 бар для зрошувача з номінальним діаметром отвору 20 мм (див. рис. 5). Це пояснюється тим, що гостра крайка вхідного отвору створює додаткову турбулентність потоку, яка за швидкостей води у діапазоні тисків (0,5–3,0) бар для зрошувача з номінальним діаметром отвору 15 мм та у діапазоні тисків (0,5–4,0) бар для зрошувача з номінальним діаметром отвору 20 мм ще не приводить до негативних результатів, а далі, вище

3,0 бар та 4,0 бар відповідно, швидкість та пов'язана з нею турбулентність потоку підвищуються настільки, що значення витрати води та К-фактора знижуються та виходять за нормовану межу, внаслідок чого такі зрошувачі підлягають бракуванню.

Висновки та напрями подальших досліджень. 1. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено негативний вплив виявленого конструктивного виконання одного з елементів проточної частини, а саме – наявності гострої крайки на вхідному отворі, на витратні характеристики зрошувача систем пожежогасіння.

2. Встановлено, що в Україні чинні два національні стандарти щодо вимог та методів випробувань спринклерів систем пожежогасіння [1–2]. Зміст та положення

обох документів здебільшого збігаються (дублюються), але за окремими позиціями відрізняється. Окрім цього, виявлено, що нині стандарт ISO 6182-1:2014, який в Україні взято за основу наведеного вище стандарту [2], замінено у новій редакції від 2021 року. Зміст та обсяг цієї редакції розширено щодо вимог та методів випробувань для інших типів зрошувачів: спринклерів зі збільшеним покриттям захищеної площі, побутових та

складських спринклерів, зокрема спринклерів зі швидким реагуванням (ESFR), спринклерів з електричним активуванням (EAS) і спринклерів із контролюванням активації (SMA).

Пропонується надалі провести вивчення наведених документів із метою пошуку можливостей впровадження в Україні єдиного стандарту щодо спринклерів, що допоможе усунути колізію, про яку зазначено вище.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ EN 12259-1:2019 (EN 12259-1 : 1999 + A1:2001, IDT) / Зміна № 3 : 2019 (EN 12259-1:1999 + M:2001/A3:2006, IDT) Стационарні системи пожежогасіння. Компоненти спринклерних і водорозпилювальних систем. Ч. 1. Спринклери. [Чинний від 2020-01-01]. Київ : УкрНДНЦ, 2019. 56 с (Інформація та документація).
2. ДСТУ ISO 6182-1:2019 (ISO 6182-1:2014, IDT) Протипожежний захист. Автоматичні спринклерні системи. Ч. 1. Вимоги та методи випробування спринклерів. [Чинний від 2020-01-01]. Київ : УкрНДНЦ, 2019. 68 с (Інформація та документація).
3. ДСТУ Б EN 12845:2011. (EN 12845:2004+A2:2009 IDT) Ч. 2. Стационарні системи пожежогасіння. Автоматичні спринклерні системи. Проектування, монтування та технічне обслуговування. [Чинний від 2012-06-01]. Київ : Мінрегіон України, 2012. 19 с. (Інформація та документація).
4. Дурєєв В. О. Дослідження впливу геометричних характеристик зрошувачів і трубопроводів на гідравлічні параметри розподільчої мережі системи водяного пожежогасіння. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій*: матер. IX Міжнар. наук.-практич. конф. Черкаси : ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2018. С. 95. 96 с.
5. Liang-Han Chien, Jin-Jia, Xu, Tien-Fu Yang, Wei-Mon Yan. Experimental study on water spray uniformity in an evaporative condenser of a water chiller. *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 2019, P. 33–45.
6. Технічна механіка рідини і газу: підруч. / С. О. Вамболь, І. В. Міщенко, О. М. Кондратенко. Харків : НУЦЗУ, 2016. 300 с.

REFERENCES

1. DSTU EN 12259-1:2019 (EN 12259-1:1999 + A1:2001, IDT) / Zmina № 3:2019 (EN 12259-1:1999 + M:2001/A3:2006, IDT) Stacionarni systemy pozhezhohasinnia. Komponenty sprynklernykh i vodorozpyliuvalnykh system. Chastyna 1. Sprynklery. [Chynnyi vid 2020-01-01]. Kyiv, UkrNDNTs, 2019. 56 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].
2. DSTU ISO 6182-1:2019 (ISO 6182-1:2014, IDT) Protypozhezhnyi zakhyst. Avtomatychni sprynklerni systemy. Chastyna 1. Vymohy ta metody vyprovuvannia sprynkleriv. [Chynnyi vid 2020-01-01]. Kyiv, UkrNDNTs, 2019. 68 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia). [in Ukrainian].
3. DSTU B EN 12845:2011. (EN 12845:2004+A2:2009 IDT) Chastyna 2. Statsionarni systemy pozhezhohasinnia. Avtomatychni sprynklerni systemy. Proektuvannia, montuvannia ta tekhnichne obsluhovuvannia. [Chynnyi vid 2012-06-01]. Kyev: Minrehion Ukrainy, 2012. 219 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia). [in Ukrainian].
4. Durieiev, V. O. Doslidzhennia. Vplyvu heometrychnykh kharakterystyk zroshuvachiv i truboprovodiv na hidravlichni parametry rozpodilchoi merezhi systemy vodianoho pozhezhohasinnia. *Teoriia i praktyka hasinnia pozhhez ta likvidatsii nadzvychnykh sytuatsii: Materialy IKh Mizhnarodnoi nauko-vo-praktychnoi konferentsii*. Cherkasy: ChIPB im. Heroiv Chornobyliya NUTsZ Ukrainy, 2018. S. 95. 96 s [in Ukrainian].
5. Liang-Han, Chien, Jin-Jia Xu, Tien-Fu Yang, Wei-Mon Yan. Experimental study on water spray uniformity in an evaporative condenser of a water chiller. *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 2019, P. 33–45 [in English].
6. Tekhnichna mekhanika ridyny i hazu: pidruch. / S. O. Vambol, I. V. Mishchenko, O. M. Kondratenko. Kharkyv: NUTsZU, 2016. 300 s [in Ukrainian].

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF CONSTRUCTIVE ELEMENTS OF FLOW PART OF THE IRRIGATOR OF FIREFIGHTING SYSTEM ON IT'S CONSUMPTION CHARACTERISTICS

V. Benediuk, A. Onyshchuk, O. Tymoshenko, P. Illuchenko

Institute of Public Administration and Research in Civil Protection, Ukraine

KEYWORDS:

technical fluid
mechanics, irrigator of
fire extinguishing
systems, sprinkler
consumption,
hydraulic resistance,
pressure loss on flow
elements, K-factor of
sprinkler, coefficient of
local hydraulic
resistance, water flow
turbulence

ANNOTATION

Problematic issues, which periodically arise while technical characteristics testing according to methods and procedure which specified in DSTU EN 12259-1:2019, for individual batches of specimens of irrigators of water-foam extinguishing system with or without marking of well-known foreign brands, but unknown manufactures, probably not original product, due to which, objectively, these specimens of sprinklers are rejects, have been analyzed. In particular, it is connected with obtaining unsatisfactory test results regarding such product quality indicators as: K-factor. To find out the reasons for these unsatisfactory test results, theoretical research was conducted in the field of technical fluid mechanics (hydrodynamics) and the cause of the mentioned problem was previously identified. Further research of sprinkler specimens, that did not meet the requirements of the specified standard, confirmed the influence of the identified design flaw, presumably allowed during the manufacture of the rejected sprinklers, on the test results. It was clarified and confirmed that the reason lies in the manufacturing defect of the flow part of the sprinkler, namely the presence of a sharp edge on its inlet opening. After finalizing the design, by removing the sharp edge (chamfering), the results of repeated hydraulic tests showed that the parameters of the sprinkler returned to normal. The results of this research are presented in the materials of this publication in graphic form. Therefore, it's necessary in any possible way, including this publication, inform manufacturers and customers of this production about necessary checking of presenting of chamfer or smooth rounding of the edge of inlet opening of the flow part of the product, because it's absence can be one of signs of the non-original sprinklers and reason of irrigators defect.

УДК 614.841

ВАЛІДАЦІЯ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОВИХ ПОКАЗНИКІВ СИСТЕМ ВОГНЕЗАХИСТУ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2.113-122>

Новак М. С.*, ORCID iD 0000-0002-5888-5812

Харкянен О. В., ORCID iD 0000-0003-4774-9222

*E-mail: novak.mikhailo.work@gmail.com

Національний університет харчових технологій, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 29.09.2023

Пройшла рецензування: 14.10.2023

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

валідація, валідаційний експеримент, вогнестійкість, математична модель, система вогнезахисту, сталева конструкція, теплові показники.

АНОТАЦІЯ

Надано процедуру валідації методів визначення теплових показників систем вогнезахисту сталевих конструкцій, засновану на проведенні натурного (валідаційного) експерименту, яка забезпечує автоматизацію процесу валідації. Ця процедура містить етапи експериментального визначення температури зразків сталевих конструкцій (балок, колон завдовжки 1,0 м), оснащених певною системою вогнезахисту, в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму, розрахунку теплових показників за методикою, наведеною в стандартах EN 13381-4 і EN 13381-8, та за методикою, яку засновано на розв'язанні оберненої задачі теплопровідності й задачі оптимізації та порівняння розрахункових і дійсних значень визначальних показників. Методика проведення валідаційного експерименту, регламентована в процедурі, відповідає наведеній в зазначених стандартах, за винятком того, що в ній не застосовують навантажені зразки (балки чи колони), призначені для оцінювання здатності системи вогнезахисту до зчеплення. Застосована математична модель для визначення розрахункових значень коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного матеріалу і необхідної мінімальної товщини вогнезахисту відповідає наведеній в зазначених стандартах. У математичній моделі, яку використовують в процедурі валідації для визначення дійсних (умовно точних) значень коефіцієнта теплопровідності та необхідної мінімальної товщини, на обігрівній поверхні системи вогнезахисту задають граничні умови складного конвективно-радіаційного теплообміну (коефіцієнти тепловіддачі і теплового випромінювання, а також температуру в печі). Це її відрізняє від математичної моделі, наведеній в зазначених стандартах, в якій на цій поверхні задають значення температури, котре дорівнює температурі в печі, і не враховано теплообмін між піччю і системою вогнезахисту. З'ясовано, що для забезпечення автоматизації процесу валідації за зазначеною процедурою необхідно розробити та впровадити інтелектуальну систему керування температурним режимом у печі, а також програмний продукт, який забезпечує автоматизацію процесу введення та збереження вхідних і вихідних даних, необхідних для реалізації процедури валідації, а також розв'язання оберненої задачі теплопровідності й задачі оптимізації.

Постановка проблеми. Системи вогнезахисту застосовують для підвищення вогнестійкості будівельних конструкцій, виготовлених із різних матеріалів. Ці системи складаються з

пасивних і реактивних вогнезахисних матеріалів, до яких належать реактивні вогнезахисні покриття, штукатурки, плити, панелі та мати. Вимоги до цих вогнезахисних матеріалів регламентовано

в Європейських оцінювальних документах [1–3]. В Європейських стандартах серії EN 13381 наведено методи визначення теплових показників систем вогнезахисту, призначених для будівельних конструкцій з бетону, сталі, каменю і деревини. Зокрема, в стандартах EN 13381-4 [4] і EN 13381-8 [5] такі методи наведено для систем вогнезахисту з пасивних і реактивних матеріалів, призначених для несучих сталевих конструкцій без огорожувальної функції (балок і колон). За цими методами [4–5] експериментально визначають проміжки часу до досягнення критичної температури (яка становить від 350 °C до 700 °C) на металевій поверхні зразків цих конструкцій (балок і колон довжиною від 1,0 м до 4,0 м) в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму. За отриманими експериментальними даними, із застосуванням математичної моделі, яка містить рівняння теплопровідності та умови однозначності, визначають теплофізичні властивості й значення мінімальної товщини певної системи вогнезахисту, необхідні для забезпечення нормованих проміжків часу збереженості вогнестійкості суцільних і порожнистих сталевих конструкцій. Надалі ці результати використовують для проєктування вогнестійких сталевих конструкцій відповідно до вимог, наведених у Єврокодi 3 [6].

У стандартах EN 13381-4 [4] і EN 13381-8 [5] надано детальний опис процедур щодо створення експериментальних зразків, проведення випробувань і оброблення отриманих експериментальних даних, однак не надано інформацію про ступінь відповідності одержуваних результатів дійсним значенням теплових показників систем вогнезахисту. Такий ступінь відповідності встановлюють під час валідації методів, основною метою якої є підтвердження того, що метод «придатний для конкретного застосування» [7–8].

Для валідації методів, наведених в EN 13381-4 [4] і EN 13381-8 [5], в роботі [9] запропоновано процедуру, яка ґрунтується на проведенні обчислювальних експериментів на основі математичного моделювання теплового стану сталевої конструкції в умовах

вогневого впливу за стандартного температурного режиму. В ній реалізовано автоматизацію процесу введення і збереженості вхідних і вихідних даних, які використовують в комп'ютерних програмах цієї процедури, що дає змогу уникнути багаторазового втручання оператора. Крім цього, у цій процедурі передбачено проведення валідації для змінної кількості експериментальних зразків. Це є її певними перевагами, однак вона має і певні недоліки. Ця процедура заснована тільки на проведенні обчислювальних експериментів і не передбачає використання даних фізичних (натурних) експериментів, які могли б забезпечити отримання наближених до дійсних даних щодо теплофізичних властивостей, застосовних у системах вогнезахисту матеріалів. Не є вирішеним також питання щодо повної автоматизації процесу валідації. Це накладає певні обмеження на використання наведеної в роботі [9] процедури валідації.

Ураховуючи наведене і зважаючи на доцільність підвищення точності визначення даних про ступінь відповідності результатів випробувань дійсним значенням визначальних показників, актуальним слід вважати дослідження, спрямоване на подальше удосконалення та розвиток технології валідації методів визначення теплових показників систем вогнезахисту сталевих конструкцій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Числові прогнози визначальних показників, вимірюваних у фізичних системах, ґрунтуються на використанні математичних моделей, які мають бути валідовані. Валідація моделі зазвичай передбачає порівняння експериментальних даних (визначальних показників системи) і прогнозів моделі, отриманих за конкретним сценарієм валідації. Проєктування цього валідаційного експерименту має безпосередньо стосуватися моделі, тобто передбачати визначальний показник за сценарієм прогнозування. Щоб оцінити потенціал моделі для прогнозування певного визначального показника вона має бути валідована. Інакше кажучи, похибка між моделлю та реальністю, яку вона має

описати, повинна бути точно кількісно визначена щодо цього визначального показника [10].

Під час процесу валідації передбачено порівняння результатів моделі з експериментальними даними, отриманими під час випробування досліджуваної системи. Останнім часом у літературі запропоновано декілька процедур валідації моделі. Наприклад, у роботі [11] здійснено детальний огляд процесів верифікації та валідації, тоді як у [12] – ретельне обговорення цих двох процесів із зосередженням на розгляді як алеаторної, так і епістемічної невизначеності. В оглядовій статті [13] ґрунтовно проаналізовано масштаби та недоліки підходів до валідації. Стаття [14] містить огляд літератури, присвяченої проблемам невизначеності, калібрування параметрів і валідації моделі.

Валідація моделі стає все більш актуальною та першорядною в галузі обчислювальних наук та техніки через складність моделей, які зараз використовуються, як і попит на прогнозні та кількісні результати. Однак критичним аспектом залишається вибір відповідних валідаційних експериментів, оскільки вони надають експериментальні дані, з якими порівнюється прогноз моделі, і таким чином безпосередньо впливають на думку про те, чи вважається модель дійсною (правильною) чи ні. Це питання стає ще більш важливим, коли кількість валідаційних експериментів або обсяг даних обмежені. В роботі [10] розглянуто два конкретні питання, що виникають під час проєктування валідаційних експериментів. Перше з них полягає у визначенні відповідного сценарію валідації, якщо сценарій прогнозу неможливо виконати в контрольованому середовищі. Друге питання стосується вибору спостережень, коли кількісну оцінку визначального показника не може бути легко проведено. В роботі [11] розглянуто питання про унікальність характеристик валідаційних експериментів. Зазначено, що валідаційний експеримент – це більше, ніж традиційний високоякісний експеримент. Він має надавати інформацію, яка зазвичай недоступна у традиційних експериментах,

і бути оптимізованим для нетрадиційних клієнтів, таких як розробники математичних моделей і аналітики моделювання.

Загальні вимоги щодо верифікації та валідації аналітичних моделей, алгебраїчних співвідношень, а також складних числових моделей, що використовуються як розрахункові методи для інжинірингу пожежної безпеки, надано в міжнародному стандарті ISO 16730-1 [8]. Технічний звіт ISO 16730-4 [15] містить приклад застосування процедур верифікації та валідації, наведених у ISO 16730-1 [8], для моделі вогнестійкості стінової конструкції. Ця модель поєднує підмодель теплопровідності та структурну підмодель. Підмодель теплопровідності прогнозує профіль температури всередині дерев'яної стіни і проміжок часу до настання граничного стану за ознакою втрати теплоізолювальної здатності. Структурна підмодель, заснована на пружному навантаженні на вигин, використовує температурний профіль для розрахунку прогину конструкції та проміжку часу до настання її граничної деформації.

У роботі [16] наведено процедуру і результати валідації скінченно-елементної моделі вогнестійкості залізобетонної конструкції, що піддають вогневому впливу за номінального температурного режиму. Ця процедура заснована на порівнянні експериментальних даних із прогнозними значеннями визначального показника, отриманими за моделлю.

У роботі [9] надано процедуру валідації методів визначення теплових показників систем вогнезахисту сталевих конструкцій, яку засновано на проведенні обчислювального експерименту. Згідно з цією процедурою здійснюють порівняння даних щодо теплових показників системи вогнезахисту, отриманих за допомогою обчислювального експерименту, і за моделлю, наведений в стандартах EN 13381-4 [4] і EN 13381-8 [5]. У цій процедурі вхідними даними для валідації слугують результати розв'язання прямих задач теплопровідності щодо теплового стану сталевих конструкцій в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму. Вона має певні

недоліки, зокрема, в ній не передбачено проведення натурного (валідаційного) експерименту і немає повної автоматизації процесу валідації.

З огляду на зазначене є підстави вважати, що недостатня досконалість процесу валідації методів визначення теплових показників систем вогнезахисту сталевих конструкцій зумовлює проведення досліджень в цьому напрямі.

Формулювання цілей дослідження. За мету дослідження ставилось встановлення процедури валідації методів визначення теплових показників систем вогнезахисту сталевих конструкцій, заснованої на проведенні натурного (валідаційного) експерименту, яка забезпечує автоматизацію процесу валідації.

Для її досягнення поставлено завдання щодо визначення етапів і експериментальних та розрахункових складових цієї процедури, а також вимог до програмного забезпечення, необхідного для її реалізації.

Методи дослідження. Застосовано метод дослідження, складовими якого є аналізування, синтез, порівняння, узагальнення і систематизація.

Виклад основного матеріалу. За результатами розгляду джерел інформації, враховуючи положення, надані в стандартах EN 13381-4 [4], EN 13381-8 [5], ISO 16730-1 [8], запропоновано процедуру валідації методів визначення теплових показників систем вогнезахисту сталевих конструкцій, яку схематично показано на рис. 1.

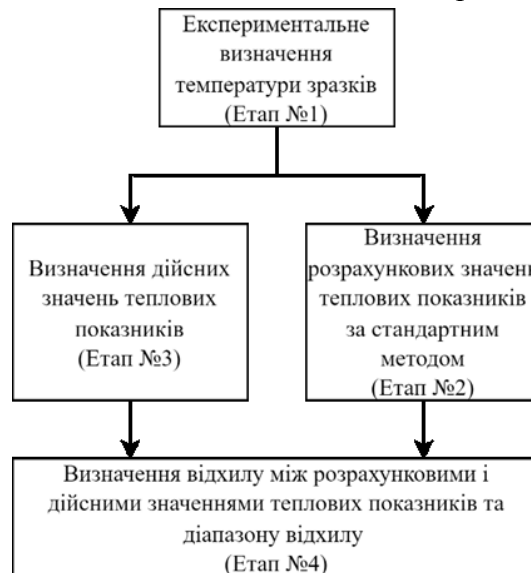


Рисунок 1 – Процедура валідації методів визначення теплових показників систем вогнезахисту сталевих конструкцій

На першому етапі валідації експериментально визначають температуру на металевій поверхні низки експериментальних зразків (балок, колон завдовжки 1,0 м), оснащених певною системою вогнезахисту, в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму. Кількість цих зразків є змінною і залежить від передбачуваної сфери застосування результатів визначення теплових показників системи вогнезахисту (типу системи вогнезахисту (профільована чи коробчаста), типу конструкції (балка чи колона), профілю сталеві конструкції

(суцільна чи порожниста)) і номера набору експериментальних зразків, котрі надано в [4–5], які задають під час валідації. Для сталевих конструкцій з пасивною системою вогнезахисту ця кількість може становити від 4 до 24 [4], а з реактивною – від 6 до 26 [5]. Параметри цих зразків (коефіцієнт поперечного перерізу конструкції і товщина вогнезахисту) є різними. Зразки препарують термopамми, встановлюють у вогневу піч без механічного навантаження і піддають вогневому впливу за стандартного температурного режиму. Під час експерименту із використанням

аналого-цифрових перетворювачів вимірюють та регулюють температуру в печі, вимірюють температуру зразків і передають отримані температурні дані до комп'ютера. Регулювання температури в печі здійснюють таким чином, щоб середня температура в печі θ_{furn} (далі – температура в печі), яку визначають за показами пластинчастих термометрів, була максимально наближеною до номінального значення θ_s (формула (1)) і відхил d_e (формула (2)) площі під кривою температури в печі $\theta_{furn}(t)$ від площі під кривою номінального температурного режиму $\theta_s(t)$ не перевищував таких значень [17]:

- а) $\pm 15\%$ для $5 < t \leq 10$;
- б) $\pm 15 - 0,5(t - 10)\%$ для $10 < t \leq 30$;
- в) $\pm 5 - 0,083(t - 30)\%$ для $30 < t \leq 60$;
- г) $\pm 2,5\%$ для $t > 60$.

$$\theta_s = 345 \lg(8t + 1) + 20; \quad (1)$$

$$d_e = 100(A_{furn} - A_s)/A_s \quad (2)$$

де θ_s – номінальна температура в печі, яка відповідає проміжку часу t , °C;

t – проміжок часу, що відраховується від початку вогневого впливу (від запалювання пальників у печі), хв;

d_e – відхил площі під кривою температури в печі $\theta_{furn}(t)$ від площі під кривою номінального температурного режиму $\theta_s(t)$, %;

A_{furn} – площа під кривою температури в печі $\theta_{furn}(t)$, °C·хв;

A_s – площа під кривою номінального температурного режиму $\theta_s(t)$, °C·хв.

Слід зазначити, що значення відхилу d_e для проміжку часу t від 0 до 5 хв не нормовано через значну теплову інерційність пластинчастих термометрів, які використовують для вимірювання температури в печі [18].

Отримані експериментальні значення температури зразків ($\theta_{a,1}, \theta_{a,2}, \dots, \theta_{a,n}$, де n – кількість зразків) використовують для розрахунку теплових показників системи вогнезахисту за методом, встановленим у стандартах EN 13381-4 [4], EN 13381-8 [5], (етап № 2). Відповідно до цього методу за даними щодо температури зразків розраховують коефіцієнт теплопровідності $\lambda_{p,cal}$ вогнезахисного матеріалу, який

застосовано в системі вогнезахисту, і значення необхідної мінімальної товщини $d_{p,cal}$ вогнезахисту. Під час цих розрахунків використовують одномірне скінченно-різницеve рівняння теплопровідності і розглядають два альтернативні варіанти, в одному з них коефіцієнт теплопровідності $\lambda_{p,cal}$ задають змінним (залежним від температури), в іншому – незалежним від температури. Відповідно до стандартів EN 13381-4 [4], EN 13381-8 [5] застосовність отриманих значень коефіцієнта теплопровідності $\lambda_{p,cal}$ до розрахунку товщини $d_{p,cal}$ перевіряють за такими критеріями прийнятності:

- для кожного зразка жодне розрахункове за рівнянням теплопровідності значення проміжку часу t_{cal} до досягнення критичної температури не повинно перевищувати відповідного експериментального значення t_{exp} більше ніж на 15%;

- для кожного зразка середнє значення усіх відсоткових відмінностей t_{cal} від t_{exp} має бути меншим за нуль;

- більшим за нуль мають бути не більше ніж 30% окремих значень усіх відсоткових відмінностей t_{cal} від t_{exp} .

Однак слід зазначити, що застосування цих критеріїв під час валідації призведе до наявності систематичної складової відхилу між розрахунковим значенням коефіцієнта теплопровідності $\lambda_{p,cal}$ і дійсним його значенням $\lambda_{p,ac}$, а також до наявності систематичної складової відхилу розрахункової товщини $d_{p,cal}$ від дійсної товщини $d_{p,ac}$ (ці відхили будуть більше нуля [19]). Отже, під час валідації для перевіряння застосовності отриманих значень коефіцієнта теплопровідності $\lambda_{p,cal}$ до розрахунку товщини $d_{p,cal}$ взято за критерій мінімальну величину середнього квадратичного відхилу між розрахунковими t_{cal} і експериментальними t_{exp} проміжками часу до досягнення критичної температури, визначеними для усіх зразків.

Алгоритм розрахунків за другим етапом описано в [9; 20]. Результатами розрахунку теплових показників системи

вогнезахисту є набір даних щодо величини необхідної мінімальної товщини вогнезахисту $d_{p,cal}$ для різних нормованих значень коефіцієнта поперечного перерізу A_p/V (від 40 м^{-1} до 400 м^{-1} , з кроком 10 м^{-1}), критичної температури θ_{cr} (від $350 \text{ }^\circ\text{C}$ до $700 \text{ }^\circ\text{C}$, з кроком $50 \text{ }^\circ\text{C}$) і проміжку часу $t_{fr,requ}$ збереженості вогнестійкості сталевій конструкції (від 15 хв до 240 хв).

На третьому етапі за отриманими експериментальними даними щодо температури зразків визначають дійсні (умовно точні) теплові показники системи вогнезахисту. Під час цих розрахунків використовують математичну модель, яка містить одномірне нестационарне нелінійне рівняння теплопровідності з граничними умовами конвективно-радіаційного теплообміну [9]. Із залученням цієї моделі здійснюють визначення залежного від температури коефіцієнта теплопровідності $\lambda_{p,ac}$ вогнезахисного матеріалу, який застосовано в системі вогнезахисту, і значення необхідної мінімальної товщини $d_{p,ac}$ вогнезахисту. Коефіцієнт теплопровідності $\lambda_{p,ac}$ визначають через розв'язання оберненої задачі теплопровідності за екстремальним методом, опис якого надано в [21]. Результатом розв'язання цієї оберненої задачі є значення коефіцієнта теплопровідності $\lambda_{p,ac}$, за яких середній квадратичний відхил між розрахунковими і експериментальними температурами, визначеними для усіх зразків, має мінімальну величину. Значення необхідної мінімальної товщини $d_{p,ac}$ визначають через розв'язання задачі оптимізації за методом, наведеним у [20]. Цей метод

полягає у визначенні товщини $d_{p,ac}$, за якої розрахункова температура сталевій конструкції дорівнює критичній температурі θ_{cr} . Розрахункову температуру сталевій конструкції визначають через розв'язання прямої задачі теплопровідності. Результатами розрахунку теплових показників системи вогнезахисту, отриманими за цим етапом, є набір даних щодо величини необхідної мінімальної товщини вогнезахисту $d_{p,ac}$ для тих же нормованих значень коефіцієнта поперечного перерізу A_p/V , критичної температури θ_{cr} і проміжку часу $t_{fr,requ}$ збереженості вогнестійкості сталевій конструкції, які застосовували на другому етапі.

На четвертому етапі визначають відсотковий відхил δ_d розрахункових значень необхідної мінімальної товщини $d_{p,cal}$ від $d_{p,ac}$ і наводять його в табличній формі (табл. 1). У цю таблицю надають тільки відхили, розраховані за значеннями необхідної мінімальної товщини $d_{p,cal}$, які перебувають в діапазоні товщини експериментальних зразків, а також максимальний відхил, визначений для різних величин коефіцієнта поперечного перерізу A_p/V . За цієї формою наводять дві таблиці: одну – для варіанта зі змінним коефіцієнтом теплопровідності $\lambda_{p,cal}$, другу – для варіанта з незалежним від температури $\lambda_{p,cal}$. За наведеними в таблицях даними щодо δ_d для кожного з цих варіантів встановлюють мінімальне та максимальне значення відхилу і відповідний його діапазон $[\delta_{d,min}, \delta_{d,max}]$ (табл. 1).

Таблиця 1 – Форма надання результатів визначення відхилу δ_d

Критична температура $\theta_{cr}, \text{ }^\circ\text{C}$	350	400	450	500	550	600	650	700
Нормований проміжок часу збереженості вогнестійкості $t_{fr,requ}$, хв	Значення відхилу $\delta_d, \%$							
15								
30								
...								
240								
Діапазон відхилу $[\delta_{d,min}, \delta_{d,max}]$								

Щодо запропонованої процедури валідації (рис. 1) слід зазначити таке.

Методика проведення валідаційного експерименту (етап № 1) відповідає наведений у стандартах EN 13381-4 [4], EN 13381-8 [5], за винятком того, що в ній не застосовують навантажені зразки (балки чи колони) для оцінювання здатності системи вогнезахисту до зчеплення. Це зроблено для отримання більш точних результатів валідації методів визначення коефіцієнта теплопровідності $\lambda_{p,cal}$ і необхідної мінімальної товщини $d_{p,cal}$, які наведено в цих стандартах.

Математична модель, яку застосовано на другому етапі для розрахунків $\lambda_{p,cal}$ і $d_{p,cal}$, відповідає наведений в стандартах EN 13381-4 [4], EN 13381-8 [5] і є спрощеною. В цій моделі на обігрівній поверхні системи вогнезахисту задано значення температури, яке дорівнює температурі в печі, і не враховано теплообмін між піччю і цією системою. В математичній моделі, яку застосовують на третьому етапі валідації, на цій поверхні задають граничні умови складного конвективно-радіаційного теплообміну (коефіцієнти тепловіддачі і теплового випромінювання, а також температуру в печі) [9], що забезпечує отримання значень коефіцієнта теплопровідності $\lambda_{p,ac}$ і необхідної мінімальної товщини $d_{p,ac}$, найбільш наближених до дійсних.

Крім цього, для автоматизації процесу валідації за процедурою, наведеною на рис. 1, необхідно розробити низку таких заходів.

Для здійснення автоматизованого керування температурним режимом у печі потрібно розробити та впровадити інтелектуальну систему, що придатна виконувати оптимальне регулювання витрат рідкого пального і повітря у пальниках через змінення тиску в їхніх магістралях для наближення температурного режиму в печі до номінального. Для цієї розробки необхідно виконати низку досліджень, зокрема це дослідження, орієнтовані на виявлення впливу щільності теплового потоку від

пальників у печі на покази пластинчастих термометрів і визначення параметрів системи керування для проміжку часу вогневого впливу до 5 хв, для якого не встановлено допустимий відхил фактичного температурного режиму в печі від номінального.

Потрібно створити програмний продукт, який забезпечує автоматизацію процесу введення і збереження вхідних даних, необхідних для реалізації процедури валідації, розв'язання необхідної кількості прямих задач теплопровідності для вирішення оберненої задачі й задачі оптимізації та отримання вихідних даних щодо відсоткового відхилення розрахункових значень необхідної мінімальної товщини вогнезахисту від дійсних та відповідного його діапазону. Вхідними даними є параметри експериментальних зразків (величини коефіцієнта поперечного перерізу $((A_p/V)_{min}, \dots, (A_p/V)_{max})$ і товщини вогнезахисту $(d_{p,exp,1}, d_{p,exp,2}, \dots, d_{p,exp,n})$ та значення критичної температури $(\theta_{cr,min}, \dots, \theta_{cr,max})$. Для програмного забезпечення виконання третього етапу валідації є доцільним застосувати прикладну програму FRIEND-2 [21], призначену для розв'язання прямих і обернених задач теплопровідності. В цій програмі впроваджено чисельний метод розв'язання одномірних прямих і обернених задач теплопровідності за неявною кінцево-різницевою схемою апроксимації. В її директоріях розміщені основний файл-вирішувач, вхідні та вихідні файли розв'язання цих задач теплопровідності. Ця програма придатна для розв'язання обернених задач теплопровідності за даними щодо температури декількох експериментальних зразків $(\theta_{a,1}, \theta_{a,2}, \dots, \theta_{a,n})$ з високою точністю [21]. Розроблюваний програмний продукт, який має здійснювати автоматизацію процесу валідації за процедурою, наведеною на рис. 1, повинен забезпечувати завдання вхідних даних і автономний запуск задач через програму FRIEND-2, а також ітераційний процес розв'язання оберненої

задачі теплопровідності й задачі оптимізації.

Висновки та напрями подальших досліджень. У цьому дослідженні встановлено процедуру валідації методів визначення теплових показників систем вогнезахисту сталевих конструкцій, засновану на проведенні натурного експерименту, яка забезпечує автоматизацію процесу валідації.

Наведено етапи цієї процедури, які містять експериментальне визначення температури низки зразків сталевих конструкцій, оснащених певною системою вогнезахисту, в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму, визначення розрахункових і дійсних значень необхідної мінімальної товщини вогнезахисту та відхилу між ними.

Встановлено, що для забезпечення автоматизації процесу валідації за цією процедурою необхідно розробити та впровадити інтелектуальну систему керування температурним режимом у печі, а також програмний продукт, який забезпечує автоматизацію процесу введення і збереження вхідних і вихідних даних, необхідних для реалізації процедури валідації, а також розв'язання оберненої задачі теплопровідності й задачі оптимізації через використання програми FRIEND-2.

Окреслено напрями подальших досліджень, які орієнтовані на виявлення впливу щільності теплового потоку від пальників у печі на покази пластинчастих термометрів і визначення параметрів системи керування температурним режимом у печі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. EAD 350402-00-1106 Reactive coatings for fire protection of steel elements. EOTA 2017. 32 p.
2. EAD 350140-00-1106 Renderings and rendering kits intended for fire resistant applications. EOTA 2017. 48 p.
3. EAD 350142-00-1106 Fire protective board, slab and mat products and kits. EOTA 2017. 60 p.
4. 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.
5. 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.
6. EN 1993-1-2:2005. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1–2: General rules – Structural fire design. European committee for standardization. Management Centre : rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2005 CEN. 78 p.
7. EN ISO/IEC 17025:2017 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. European committee for standardization. Management Centre : Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2017 CEN. 30 p.
8. ISO 16730-1:2015 Fire safety engineering – Procedures and requirements for verification and validation of calculation methods – Part 1 : General. CH-1214 Vernier, Geneva, Switzerland. ISO 2015. 42 p.
9. Новак С., Новак М. Розроблення автоматизованої процедури валідації методів розрахунку характеристики вогнезахисної здатності покриттів для сталевих конструкцій. *Науковий вісник : Цивільний захист та пожежна безпека*. 2021. № 1(11). С. 3–10.
10. Antonin Paquette-Rufange, Serge Prudhomme, Marc Laforest. Optimal design of validation experiments for the prediction of quantities of interest. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2023. Vol. 414. P. 116–182.
11. William L. Oberkampf, Timothy G. Trucano. Verification and validation benchmarks. *Nuclear Engineering and Design*. 2008. Vol. 238. P. 716–743.
12. Christopher J. Roy, William L. Oberkampf. A comprehensive framework for verification, validation, and uncertainty quantification in scientific computing. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2011. Vol. 200. P. 2131–2144.
13. Stefan Riedmaier, Benedikt Danquah, Bernhard Schick, Frank Diermeyer, Unified Framework and Survey for Model Verification, Validation and Uncertainty Quantification. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2020. Vol. 28. P. 2655–2688.
14. Guesuk Lee, Wongon Kim, Hyunseok Oh, Byeng D. Youn, Nam H. Kim. Review of statistical model calibration and validation – from the perspective of uncertainty structures. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2019. Vol. 60. P. 1619–1644.
15. ISO/TR 16730-4:2013 Fire safety engineering – Assessment, verification and validation of calculation methods – Part 4 : Example of a structural model. CH-1214 Vernier, Geneva, Switzerland. ISO 2013. 15 p.
16. I. Džolev, M. Cvetkovska, V. Radonjanin, Đ. Ladinović, M. Laban. Modelling approach of structural fire performance. 1st International Symposium Students for Resilient society S-FORCE 2018. Novi Sad, September 28–29. 2018. P. 17–24.
17. 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.
18. Новак С., Добростан О., Абрамов О. Вплив параметрів засобів вимірювання температури в печі на результати випробувань будівельних конструкцій і виробів на вогнестійкість. *Науковий вісник : Цивільний захист та пожежна безпека*. 2022. № 1(13). С. 4–14.

19. Григор'ян Н., Круковский П., Новак С. Области применения стандартизованных методов определения огнезащитной способности огнезащитных покрытий металлических конструкций : монография. Черкассы: ЧИПБ им. Героев Чернобыля НУГЗ Украины, 2016. 132 с.
20. Новак С., Новак М. Валідація методів розрахунку мінімальної товщини вогнезахисних матеріалів для сталевих конструкцій. *Науковий вісник : Цивільний захист та пожежна безпека*. 2020. № 2 (10). С. 83–90.
21. Круковский П., Новак С., Поклонский В., Еременко С., Фролов Г. Оценка огнестойкости металлических строительных конструкций и огнезащитной способности покрытий (расчетно-экспериментальный подход) : коллективная монография. Киев : Франко Пак. 2021. 148 с.

REFERENCES

1. EAD 350402-00-1106 Reactive coatings for fire protection of steel elements. EOTA 2017. 32 p. [in English].
2. EAD 350140-00-1106 Renderings and rendering kits intended for fire resistant applications. EOTA 2017. 48 p. [in English].
3. EAD 350142-00-1106 Fire protective board, slab and mat products and kits. EOTA 2017. 60 p. [in English].
4. 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].
5. 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].
6. EN 1993-1-2:2005. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1–2 : General rules – Structural fire design. European committee for standardization. Management Centre : rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2005 CEN. 78 p. [in English].
7. EN ISO/IEC 17025:2017 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. European committee for standardization. Management Centre : Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2017 CEN. 30 p. [in English].
8. ISO 16730-1:2015 Fire safety engineering – Procedures and requirements for verification and validation of calculation methods – Part 1 : General. CH-1214 Vernier, Geneva, Switzerland. ISO 2015. 42 p. [in English].
9. Novak, S., Novak, M. Rozroblennia avtomatyzovanoi protsedury validatsii metodiv rozrakhunku kharakterystyky vohnezakhysnoi zdatnosti pokryttiv dlia stalevykh konstrukttsii [Development of an automated procedure for validation of methods of calculation of characteristics of fire protective capacity for coatings for steel structures]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*. 2021. № 1(11). S. 3–10. [in Ukrainian].
10. Antonin, Paquette-Rufiange, Serge, Prudhomme, Marc, Laforest. Optimal design of validation experiments for the prediction of quantities of interest. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2023. Vol. 414. P. 116–182. [in English].
11. William L. Oberkampf, Timothy G. Trucano. Verification and validation benchmarks. *Nuclear Engineering and Design*. 2008. Vol. 238. P. 716–743. [in English].
12. Christopher J. Roy, William L. Oberkampf. A comprehensive framework for verification, validation, and uncertainty quantification in scientific computing. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2011. Vol. 200. P. 2131–2144. [in English].
13. Stefan, Riedmaier, Benedikt, Danquah, Bernhard, Schick, Frank, Diermeyer. Unified Framework and Survey for Model Verification, Validation and Uncertainty Quantification. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2020. Vol. 28. P. 2655–2688. [in English].
14. Guesuk, Lee, Wongon, Kim, Hyunseok, Oh, Byeng D., Youn, Nam H., Kim. Review of statistical model calibration and validation – from the perspective of uncertainty structures. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2019. Vol. 60. P. 1619–1644. [in English].
15. ISO/TR 16730-4:2013 Fire safety engineering – Assessment, verification and validation of calculation methods – Part 4: Example of a structural model. CH-1214 Vernier, Geneva, Switzerland. ISO 2013. 15 p. [in English].
16. Džolev, I., Cvetkovska M., Radonjanin, V., Ladinović, Đ., Laban M. Modelling approach of structural fire performance. 1st International Symposium Students for Resilient society S-FORCE 2018. Novi Sad, September 28–29. 2018. P. 17–24. [in English].
17. 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].
18. Novak, S., Dobrostan, O., Abramov, O. Vplyv parametriv zasobiv vymiruvannia temperatury v pechi na rezultaty vyprobuvan budivelnnykh konstrukttsii i vyrobiv na vohnestiikist [Influence of parameters of means of temperature measurement in the furnace on the results of fire resistance tests of building structures and products]. *Naukovyi visnyk : Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*. 2022. № 1(13). S. 4–14. [in Ukrainian].
19. Grigor'yan N., Krukovskij P., Novak S. Oblasti primeneniya standartizirovannykh metodov opredeleniya ognezashhitnoj sposobnosti ognezashhitnykh pokry'tij metallicheskich konstrukcij [Areas of application of standardized methods for determining the fire retardant ability of fire retardant coatings of metal structures]: monografiya. Cherkassy': ChIPB im. Geroev Chernoby'lya NUGZ Ukrainy'. 2016. 132 s. [in Russian].
20. Novak, S., Novak, M. Validatsiia metodiv rozrakhunku minimalnoi tovshchyny vohnezakhysnykh materialiv dlia stalevykh konstrukttsii [Validation of methods for calculating the minimum thickness of fire-retardant materials for steel structures]. *Naukovyi visnyk : Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*. 2020. № 2(10). S. 83–90. [in Ukrainian].
21. Krukovskij, P., Novak, S., Poklonskij, V., Eremenko, S., Frolov, G. Otsenka ognestojkosti metallicheskich stroitel'nykh konstrukcij i ognezashhitnoj sposobnosti pokry'tij (raschetno-e'ksperimental'ny'j podkhod) [Evaluation of the fire resistance of metal building structures and the fire retardant ability of coatings (computational and experimental approach)]. Kiev: Franko Pak, 2021. 148 s. [in Russian].

VALIDATION OF METHODS FOR DETERMINING THERMAL PERFORMANCE OF FIRE PROTECTION SYSTEMS OF STEEL STRUCTURES

M. Novak, O. Kharkianen

The National University of Food Technologies, Ukraine

KEYWORDS:

validation,
validation
experiment, fire
resistance,
mathematical
model, fire
protection system,
steel structure,
thermal
performance.

ANNOTATION

This article presents the procedure for the validation of methods for determining the thermal performance of fire protection systems of steel structures, based on conducting a full-scale (validation) experiment, which ensures the automation of the validation process. This procedure includes the stages of experimental determination of the temperature of samples of steel structures (beams, columns 1.0 m long), equipped with a certain fire protection system, under the conditions of fire exposure at a standard temperature regime, calculation of thermal performance according to the methodology given in the standards EN 13381-4 and EN 13381-8, and according to the method, which is based on solving the inverse problem of thermal conductivity and the optimization problem, and comparing the calculated and actual values of the determining performance. The method of conducting the validation experiment, regulated in the procedure, corresponds to that given in the specified standards, except that it does not use loaded samples (beams or columns) intended for evaluating the ability of the fire protection system to bond. The applied mathematical model for determining the calculated values of the coefficient of thermal conductivity of the fire protection material and the required minimum thickness of the fire protection corresponds to that given in the specified standards. In the mathematical model, which is used in the validation procedure to determine the valid (conditionally accurate) values of the thermal conductivity coefficient and the required minimum thickness, the boundary conditions of complex convective-radiative heat exchange (coefficients of heat transfer and thermal radiation, as well as the temperature in the furnace) are set on the heating surface of the fire protection system. It was determined that in order to ensure the automation of the validation process according to the specified procedure, it is necessary to develop and implement an intelligent temperature control system in the furnace, as well as a software product that ensures the automation of the input process and the preservation of input and output data necessary for the implementation of the validation procedure, as well as the development solving the inverse heat conduction problem and the optimization problem.

УДК 614.841

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЦЕПТУРИ ВОГНЕГАСНОГО ПОРОШКУ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ДЛЯ КОМБІНОВАНОГО ГАСІННЯ ПОЖЕЖ КЛАСУ А, В та D

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2.123-134>

Ковалишин В. В., ORCID iD 0000-0002-5463-0230
Марич В. М., ORCID iD 0000-0001-7051-4494
Веселівський Р. Б.*, ORCID iD 0000-0003-3266-578X
Ковалишин Вол. В., ORCID iD 0000-0003-3739-8668
Чернецький В. В., ORCID iD 0000-0002-7193-8245
*E-mail: roman_veselivskuy@yahoo.com

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 29.09.2023

Пройшла рецензування: 15.10.2022

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

вогнегасний порошок, клас пожежі, комбінована пожежа, дробовий факторний експеримент, оптимальне співвідношення.

АНОТАЦІЯ

Процес гасіння пожеж класів D (за наявності сполук легких металів) та А, В є актуальним як у воєнний час, так і в мирний період. Основну небезпеку в пожежах цих класів становлять магній, алюміній та їх сплави, що використовують і у цивільній промисловості, і у військовій галузі під час виготовлення запалювальних гранат. Ураховуючи небезпеки горіння металів та можливість виникнення комбінованих пожеж, пошук та дослідження нових складів вогнегасних речовин комбінованої дії є актуальним завданням. Проведено вогневі випробування вогнегасних порошоків для гасіння сплавів магнію та встановлено, що найбільш ефективними є NaCl, KCl, мелений шлак, мелена зола. Обгрунтовано, що пожежі за наявності легких металів супроводжуються також горінням ЛЗР, ГР та твердих горючих речовин. Отже, є доцільність додавання в рецептуру вогнегасного порошку амофосу та складників, що будуть опудрювати вогнегасну суміш і забезпечувати її текучість. Визначено оптимальні вогнегасні характеристики порошку різної рецептури для гасіння легких металів. Встановлено вплив оптимального складу вогнегасного порошку на процес пожежогасіння, що досліджено згідно з матрицями планів, складених на підставі теорії планування багатофакторних експериментів. Здійснено експериментальні розвідки щодо окремих хімічних складників вогнегасних порошоків для гасіння пожеж класу D. З'ясовано, що ефективними хімічними речовинами є хлорид натрію, мелений шлак та амофос. Виконано лабораторні дослідження вогнегасних сумішей, які складаються з натрію хлориду, амофосу, меленого шлаку та аеросилу, стеарату цинку, та визначено параметри гасіння. Встановлено, що оптимальним співвідношенням складників вогнегасного порошку, які забезпечують оптимальну величину інтенсивності подавання, є: амофос – 17,5%, NaCl – 60%, мелений шлак – 20%, аеросил / стеарат цинку – 2,5%. Отримані експериментальні результати підтверджені математичним моделюванням із використанням матриць дробових факторних експериментів 2-го порядку.

Постановка проблеми. Процес гасіння пожеж класів D (за наявності сполук легких металів) та А, В є актуальним як у воєнний час, так і в мирний період. Основну небезпеку в пожежах зазначених класів становлять

магній, алюміній та їх сплави, що використовують і в цивільній промисловості, і у військовій галузі під час виготовлення запалювальних гранат.

Слід зазначити, що особливістю пилу магнієвих сплавів є можливість його

загоряння навіть від іскри, а горіння супроводжується вибухоподібною реакцією. Пил та стружка магнію і його сплавів за наявності залишків мастила мають властивість самозагорятись. Також значну небезпеку становить пил магнію з підвищеною вологістю, горіння якого має вибухоподібний характер [1]. Наелектризований магнієвий пил здатний займатися внаслідок його накопичення на витяжних трубопроводах систем вентиляції у виробничих приміщеннях.

Зазвичай пожеж одного класу D не буває. Можуть статися пожежі класу D із виникненням надалі пожеж класів A, B або, навпаки, – пожежі легкозаймистих речовин (ЛЗР) чи твердих горючих речовин із розвитком пожеж класу D. Для їх ліквідації необхідно використовувати вогнегасні речовини комбінованої дії з урахуванням високої температури горіння легких металів та інтенсифікації горіння під час застосування для гасіння води, вуглекислого газу та азоту. Необхідно також зважати на тиск під час подавання вогнегасної речовини, величина якого буде впливати на розбризкування горючих сплавів легких металів із подальшим збільшенням площі пожежі [2]. Слід зазначити, що в Україні не виготовляються порошки для комбінованого гасіння пожеж класів D та A, B.

Формулювання цілей дослідження. Метою роботи є дослідження складів вогнегасних порошків на основі натрію хлориду з добавкою, амофосу, меленого шлаку та аеросилу / стеарату цинку, а також встановлення оптимального складу у відсотковому відношенні для ефективного гасіння пожеж класів A, B та D і розроблення оптимальної рецептури.

Задачами дослідження є:

- постановка проблеми щодо гасіння комбінованих пожеж (A, B та D);
- аналіз вітчизняних та зарубіжних складів вогнегасних речовин, призначених для гасіння пожеж класів A, B та D;
- проведення дослідження окремих хімічних складників вогнегасних порошків для гасіння пожеж класу D;

- удосконалення рецептури вогнегасних порошків для гасіння комбінованих пожеж;

- отримання оптимального складу вогнегасного порошку для гасіння комбінованих пожеж.

Методи дослідження. Методи аналізу процесів пожежогасіння, що містять послідовний підбір / перебір всіх чинників пожежогасіння і класичний регресійний аналіз, для визначення оптимальних вогнегасних характеристик порошку різної рецептури під час гасіння легких металів.

Для планування експерименту слід використовувати плани, що дають змогу отримати найбільш повну інформацію за несприятливих умов та мінімальної кількості проведення дослідів. Тобто необхідно оцінити оптимальність цих планів за різними критеріями.

За методикою [3–5] використовують плани повних факторних експериментів типу 2_k , що належать до найбільш ефективних під час побудови лінійних моделей і задовольняють як критеріям ортогональності, симетричності, нормування, рототабельності, так і критеріям D-, G-, A- і E-оптимальності. Під час застосування критерію ортогональності в планах 2-го порядку порушуються вимоги нормування і рототабельності, тобто цей критерій є недостатнім [6]. Важливішим є критерій рототабельності, який забезпечує отримання симетричних інформаційних контурів. Також він є близьким до ортогональності та мінімізує систематичні помилки.

Метод факторного планування експерименту використовуємо для дослідження впливу чинників пожежогасіння на інтенсивність подавання порошку різних рецептур. На основі досліджень чинників, що впливають на процес гасіння, і математичних моделей як поліноміальних залежностей використовуємо метод факторного планування 3_k [6].

У цьому разі визначальними факторами, що впливають на інтенсивність

подавання вогнегасного порошку під час гасіння комбінованих пожеж за наявності легких металів, є відповідний склад вогнегасної речовини А (NaCl / KCl), Б (мелений шлак), В (амофос).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблеми щодо гасіння пожеж класів А, В та D розглянуто у працях А. Антонова, В. Ковалишина, М. Вайсмана, О. Демиденка, М. Білошицького, R. Nelson, Kang et al H., C. Wilson, R. Tapscott, D. Zallen, B. Марича. Ці автори у своїх працях наголошують на застосовуванні відповідних вогнегасних речовин та засобів їх подавання для гасіння легких металів. Встановлено, що під час гасіння легких металів необхідно подавати порошок за мінімальної швидкості руху його частинок на горючу поверхню так, щоб він покривав поверхню і не роздмухував вогонь. Результати досліджень з гасіння пожеж класу D вогнегасними порошками спеціального призначення наведені у [7–8]. В усіх випадках дослідники дійшли висновку, що до складу спеціальних порошоків має входити NaCl або KCl. Наповнювачами можуть бути мелений пісок, шлак, зола, сполуки мелаїну, графіт, каолінова глина, проте відсотковий склад цих речовин потребує подальших досліджень та належних обґрунтувань. На сьогодні для гасіння пожеж класу D у Європі та США найчастіше застосовують вогнегасні порошки спеціального призначення (ВПСП) на основі хлоридів лужних металів. Як вогнегасні склади для металів використовують ряд рідинних складів (наприклад, на основі борних ефірів), але вони не набули широкого застосування в практиці пожежогасіння.

У роботі [9] пропонується гасити магній аргеном. Зазначене має сенс тільки за закритих об'ємів. Гасіння аргеном та аерозолями є об'ємним способом гасіння, що погано працює у разі поверхневого гасіння. Горіння сповільнюється, але не припиняється повністю.

Рецептура патенту CN 101455886 А від 17.06.2009 р.: для гасіння магнію та шлаку магнію; утворюється під час плавлення та

переробки магнієвих сплавів, має хороший ефект пожежогасіння. Складниками цієї рецептури є: 40–50 мас. % хлориду калію, 45–55 мас. % хлориду натрію і від 2–8 мас. % фториду кальцію. Завдяки низькій температурі плавлення порошку він швидко плавиться під час нагрівання, утворюючи рівномірне покриття на поверхні магнію.

Рецептура патенту FR 2689769 А1 від 15.10.1993 р.: містить шлак, отриманий під час виробництва заліза та сталі, в якому є близько 50 мас. % CaO, 12,5 мас. % SiO₂, 6 мас. % MgO, мас. % P₂O₅, 2 мас. % MnO, а решта – цинк, мідь, кобальт, хром і сірка; має високі вогнегасні властивості. Як недолік вказано, що композиція не є текучою, сильно поглинає вологу та швидко злежується під час зберігання. Шлак у своєму складі має елементи сірки, що підвищує його прогорання під час утворення захисного покриття на вогнищі горіння. Також не вказано хімічний елемент, який відповідає за текучість порошку.

Відомо про вогнегасний порошок (патент UA 70185 U від 25.05.2012 р.) для гасіння шматків губчастого титану, який містить сухий ільменітовий концентрат або титановий шлак, що включає оксиди титану, заліза, кремнію, марганцю тощо. Недоліком є вартість титанового шлаку, який не може бути основним компонентом у рецептурі вогнегасного порошку, тому що він не забезпечить ефективного гасіння, а може використовуватись як наповнювач.

Вогнегасний порошок – патент SU 1790951 А1 від 30.01.1993 року – призначений для гасіння легких металів, який містить негорючу легку фракцію кам'яновугільного шлаку, що є відходами теплових електростанцій, та включає оксиди кремнію і кальцію, розтікається, спікається з утворенням кірки, що перешкоджає доступу кисню до палаючого металу. Зазначено, що до вогнегасного порошку входить легка фракція кам'яновугільного шлаку, а для ефективної ізоляції і максимальної кількості потрапляння порошку на об'єкт

горіння необхідно використовувати важкі фракції.

З огляду на аналіз складів вогнегасних речовин встановлено, що недоліком цих складів є низька питома щільність, від якої залежить текучість вогнегасної речовини, а відповідно й ефективність процесу гасіння.

На основі проведеного аналізу однозначним є висновок, що гасіння легких металів потребує розроблення / вдосконалення нових вогнегасних складів, а кількісний склад компонентів суміші необхідно оптимізувати відповідно до теорії планування експерименту за умови досягнення найкращих показників.

Основні результати. Для встановлення вогнегасних характеристик складників порошку, що будуть використані для виготовлення порошків для гасіння легких металів, проводяться вогневі випробування за методикою [8].

Методика проведення експериментальних досліджень така. Увімкнути обладнання та перевірити його справність. Як пожежне навантаження

використовується стружка сплаву магнію, з якого виготовляють барабани коліс літаків. Підготовлення наважки вогнегасних речовин. Стружка сплаву магнію (20 г) висипається на термостійке деко та рівномірно розподіляється на площі 200x100 мм. Деко встановлене у лабораторній шафі. Вмикається вентиляція лабораторної шафи та одягаються засоби індивідуального захисту. Газовим пальником підпалюється магнієвий сплав. Після поширення полум'я на площу понад 50% розпочинається процес гасіння однією з підготовлених вогнегасних речовин (рис. 1) [10–11; 14–15]. Досліджуваний вогнегасний склад рівномірно насипається на поверхню, що горить, для покриття зони горіння однаковим шаром порошку. Результати гасіння (рис. 2) фіксуються в табл. 1 та 2, де вказується витрата вогнегасного порошку, час гасіння та інтенсивність подавання вогнегасної суміші. Після проведення експерименту випробувальна шафа очищається від твердих залишків магнієвих сплавів.



Рисунок 1 – Лабораторні вогневі випробування вогнегасних порошків для гасіння легких металів

З аналізу проведених досліджень окремих хімічних складників вогнегасних порошків для гасіння сплавів магнію встановлено, що найбільш ефективними є NaCl, KCl, мелений шлак, мелена зола. Зазвичай пожежі за наявності легких металів супроводжуються також горінням ЛЗР, ГР та твердих горючих речовин, тому надалі для досягнення результату гасіння комбінованої пожежі доцільно додати в рецептуру вогнегасного порошку амофос. Відомо, що ця хімічна речовина придатна

для гасіння пожеж класу В та є основною складовою сертифікованих вогнегасних порошків загального призначення [12–16]. Також для забезпечення текучості порошку необхідно додавати незначний відсоток опудрювачів, таких як аеросил, стеарат цинку, стеарат кальцію тощо.

Ураховуючи зазначене вище необхідно провести експериментальне дослідження сумішей вогнегасних порошків для гасіння пожеж класів А, В та D.

Таблиця 1 – Результати досліджень окремих складників вогнегасних порошоків для гасіння легких металів

№ експерименту	Вид вогнегасної речовини	Витрата вогн. реч., кг	Час гасіння t, с	Примітка
1.	NaCl	0,120	20	З'являються поодинокі язички полум'я
2.	KCl	0,123	22	З'являються поодинокі язички полум'я, зникають через 20 с після гасіння
3.	Каолін, біла глина	0,056	35,5	Прогоряє, з'являються язички полум'я
4.	FeO	0,13	39,2	Прогоряє, з'являються язички полум'я
5.	Аеросил	0,012	31	Не погасили
6.	Стеарат цинку	0,08	34,7	Спочатку частинки стеарату кальцію підсилюють горіння, після гасіння утворюється зв'язувальна суміш
7.	Мелена зола	0,173	32,8	З'являються поодинокі язички полум'я
8.	Мелений шлак	0,218	19,87	З'являються поодинокі язички полум'я, після гасіння через 20 с зникають
9.	Амофос	0,1	29,4	Не погасили



Рисунок 2 – Результати випробувань вогнегасних порошоків для гасіння магнію

Із проведених досліджень бачимо, що найкраще у спроможності гасіння ошурків магнію себе показали склади на основі хлориду натрію, меленого шлаку з відходів металургійного виробництва, амофосу та аеросилу зі стеаратом цинку.

З огляду на результати експериментальних досліджень, що

наведені у табл. 1, необхідно визначити оптимальні вогнегасні характеристики порошку різної рецептури для гасіння легких металів. Для цього проведемо вогневі випробування. Експеримент у лабораторних умовах здійснено за методикою [13–14; 17–18].

Таблиця 2 – Результати дослідження сумішей вогнегасних порошків для гасіння комбінованих пожеж

№ Експерименту	Вид вогнегасної речовини	Витрата вогнегасн. речовини, кг	Час гасіння t, с	Примітка
1	NaCl – 45% Шлак – 43% Амофос – 10% Аеросил – 1% Стеарат цинку – 1%	0,213	34	Після гасіння, через 10 с горіння припинене
2	NaCl – 55% Шлак – 28% Амофос – 15% Аеросил – 1% Стеарат цинку – 1%	0,205	33	Після гасіння, через 10 с горіння припинене
3	NaCl – 60% Шлак – 20% Амофос – 18% Аеросил – 1% Стеарат цинку – 1%	0,218	36	Після гасіння, через 10 с горіння припинене
4	KCl – 45% Шлак – 43% Амофос – 10% Аеросил – 1% Стеарат цинку – 1%	0,206	35	Після гасіння, через 10 с горіння припинене
5	KCl – 55% Шлак – 28% Амофос – 15% Аеросил – 1% Стеарат цинку – 1%	0,210	31	Після гасіння, через 10 с горіння припинене
6	KCl – 60% Шлак – 20% Амофос – 18% Аеросил – 1% Стеарат цинку – 1%	0,219	30	Після гасіння, через 10 с горіння припинене
7	KCl – 58% Шлак – 20% Бура – 20% Аеросил – 1% Стеарат цинку – 1%	0,195	35	Після гасіння, через 10 с відбувається прогорання
8	NaCl – 58% Шлак – 15% Мідний купорос-15 Амофос – 10% Аеросил – 1% Стеарат цинку – 1%	0,201	36	Після гасіння, через 10 с відбувається прогорання
9	NaCl – 60% Каолін, біла глина – 28% Амофос – 10% Аеросил – 1% Стеарат цинку – 1%	0,215	34	Після гасіння, через 10 с відбувається прогорання

Схема випробувань вогнегасних порошоків для встановлення їх оптимальних характеристик наведена на рис. 3.

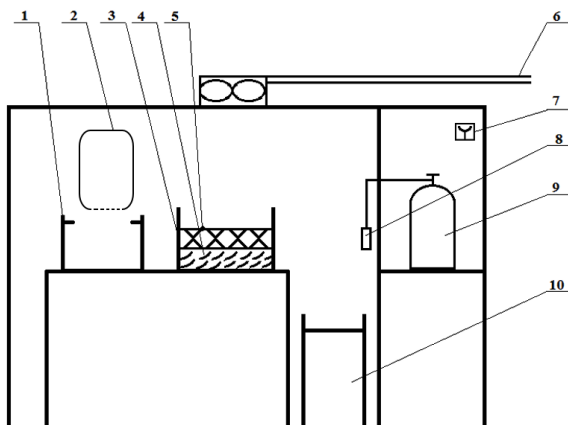


Рисунок 3 – Випробування рецептур вогнегасного порошку в лабораторних умовах: 1 – ємність з ВПСР; 2 – ємність для насипання порошку; 3 – термостійке деко; 4 – ошурки сплавів магнію; 5 – шар ВПСР; 6 – система димовилучення лабораторної шафи; 7 – вмикач системи вентиляції; 8 – газовий пальник; 9 – балон із газом; 10 – металевий бак для відпрацьованого порошку та ошурків магнію

Інтенсивність подавання вогнегасного порошку визначається за формулою (1):

$$I = m/F \times t \quad (1)$$

де I – інтенсивність подавання вогнегасної речовини, $\text{кг}/(\text{м}^2 \times \text{с})$;

m – маса витраченої вогнегасної речовини, кг

F – площа горіння, м^2

t – час подавання вогнегасної речовини, с .

Площа горіння в усіх дослідів однакова: $2,85 \times 10^{-2} \text{ м}^2$. Маса порошку, витрачена на гасіння, фіксується за фактом гасіння.

Таблиця 3 – Результати гасіння магнію та його сплаву різними вогнегасними складами, які містять хлорид натрію, мелений шлак із відходів металургійного виробництва, амофос та аеросил

№ з/п	Компоненти вогнегасного порошку			Інтенсивність I , $\text{кг}/(\text{м}^2 \times \text{с})$
	NaCl, %	мелений шлак, %	амофос, %	
1	2	3	4	5
1	80	10	7,5	0,25
2	75	13	9,5	0,26
3	70	15	12,5	0,29
4	65	17	15,5	0,3
5	60	20	17,5	0,33
6	55	23	19,5	0,36
7	50	25	22,5	0,38
8	45	27,5	25	0,43
9	45,5	28	24	0,47
10	42,5	30	25	0,5

У всіх випадках кількість аеросилу в рецептурі вогнегасних порошків становить 2,5%.

Згідно з [9; 15] відомо, що оптимальним складом вогнегасного порошку для гасіння сплавів магнію є порошок, до складу якого входить мелений шлак, хлорид натрію і аеросил. Найбільше значення у цій рецептурі має хлорид натрію та мелений шлак, але це справедливо для гасіння пожеж класу D.

Для гасіння пожеж класів А і В важливе значення має наявність в рецептурі порошків-інгібіторів горіння в кількості близько 10–30%. Основні складники порошків загального призначення є такими: фосфорамонійні солі (моно-, діамонійфосфати, амофос), карбонат і бікарбонат натрію та калію, хлориди натрію і калію [16].

Найчастіше у рецептурі сучасних порошків використовують амофос (П-2АП, «Пірант», П-4АП, П-1А, АВС «Фактор», АВС «Промікс», АВС «Вогнеборець»).

Амофос на поверхні магнію за температури понад 1300 °С прогоряє. Отже, необхідно підібрати такий склад вогнегасного порошку за максимальної кількості амофосу, що буде мати найнижчу інтенсивність гасіння пожеж класу D та найменше прогоряти.

Експериментальні дослідження проводили згідно з планами матриць дробових факторних експериментів (далі – ДФЕ) [6]. ДФЕ проводили відповідно до плану № 30, водночас за основні параметри пожежогасіння вогнегасним порошком взято: А (NaCl / KCl фактор X_1), Б (мелений шлак, фактор X_2) та В (амофос, фактор X_3). Інші фактори – незмінні: площа горіння легких металів – $2,85 \times 10^{-2} \text{ м}^2$; вміст аеросилу / стеарату цинку в рецептурі вогнегасних порошків – 2,5%. Рівні варіювання факторів для ДФЕ типу № 30 [5] беремо згідно з табл. 3.

Зв'язки між параметрами оптимізації (геометричними та фізичними параметрами, складовими різних процесів тощо) та характеристиками процесів пожежогасіння беремо як математичні залежності, що мають вигляд ступеневих

функцій. З огляду на це вважаємо, що для процесу гасіння вогнегасним порошком нелінійні за факторами математичні моделі 2-го порядку будуть адекватно описувати зв'язок між технологічними параметрами процесу пожежогасіння та параметрами оптимізації, зокрема інтенсивністю подавання вогнегасного порошку для гасіння легких металів. Виконавши стандартне логарифмічне перетворення ступеневі функції отримують рівняння регресії, для якої допустимо використовувати матриці планування експериментів:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2 \quad (2)$$

де Y – вибірка оцінка функції, що вивчається; b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – вибіркові коефіцієнти регресії (оцінки для генеральних значень коефіцієнтів регресії $\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}, \beta_{ii}$); X_i, X_j – незалежні змінні; k – загальне число незалежних змінних.

Вибіркові коефіцієнти регресії цієї моделі визначаються з використанням матриці планування і результатів експериментів; матриця нормальних рівнянь плану повинна бути не виродженою, тобто необхідно, щоб існувала обернена матриця $(X^*X)^{-1}$.

Загальне число коефіцієнтів регресії для моделі 2-го порядку передається, як

$$N_k = \frac{(k+1)(k+2)}{2} \quad (3)$$

Під час побудови математичних моделей кількість повторних дослідів вибираємо $r = 2$ для гарної їх відтворюваності. Також на вибір кількості дослідів має вплив працемісткість проведення експериментів, наявність необхідних матеріалів і обробка результатів.

Результати експериментів опрацьовували за методикою, яка містить статистичний аналіз досліджень [6]. Перевірка гіпотези про адекватність отриманої математичної моделі проводиться за даними матриці планування і результатами з неповторюваними за умовами рядками із застосуванням критерію Фішера для рівня значущості $\alpha = 0,05$. Гіпотеза про

значущість множинного коефіцієнта кореляції визначається за F-критерієм.

Таблиця 4 – Рівні варіювання факторів для ДФЕ типу № 30 [24]

№ з/п	Характеристика фактора	Кодоване позначення	Рівні варіювання		Інтервал варіювання
			Верхній	нижній	
1	NaCl A, %	X ₁	80	42,5	37,5
2	Мелений шлак B, %	X ₂	30	10	20
3	Амофос B, %	X ₃	25	7,5	17,5

Процес гасіння залежить від параметрів та способу подавання вогнегасного порошку відповідного складу у певному відсотковому співвідношенні, які відіграють визначальну роль у підвищенні ефективності процесу пожежогасіння: хлориду натрію / калію (NaCl / KCl) A, меленого шлаку B, амофосу B. Взаємний вплив оптимальних параметрів процесу пожежогасіння на інтенсивність подавання вогнегасного порошку через складність теоретичного прогнозування процесів подавання доцільно досліджувати експериментально.

Вплив оптимального складу вогнегасного порошку на процес пожежогасіння досліджували згідно з матрицями планів, складених на підставі теорії планування багатофакторних експериментів. Під час пожежогасіння комбінованих пожеж за наявності легких металів контролювали такий параметр, як інтенсивність подавання вогнегасного порошку I за різного його складу. За оптимальні параметри процесу пожежогасіння комбінованих пожеж у разі наявності легких металів взято: хлориду натрію / калію (NaCl / KCl) A, мелений шлак B, амофос B. Інші фактори –

стабілізовані: площа горіння магнію – $2,85 \times 10^{-2} \text{ м}^2$; вміст аеросилу в рецептурі вогнегасних порошків – 2,5%. На підставі експериментальних досліджень для процесу пожежогасіння магнієвих ошук беруться такі межі зміни факторів: A = 42,5 – 80%; B = 10 – 30%; C = 7,5 – 25%.

Матриця планування дробового багатофакторного експерименту та визначені значення інтенсивності подавання вогнегасного порошку, отримані під час гасіння комбінованих пожеж за наявності легких металів, наведена у табл. 4.

Обробку результатів експериментальних досліджень проводили за загальноприйнятою методикою [6]. Математичні залежності у кодованих змінних для визначення інтенсивності подавання вогнегасного порошку після перевірки однорідності дисперсій, відтворюваності у дослідах за критерієм Кохрена, значущості коефіцієнтів регресії за допомогою критерію Стюдента та адекватності математичних моделей у разі застосування критерію Фішера мають вигляд:

$$y_1 = -0,4589 - 0,3227 \cdot x_1^2 - 0,324 \cdot x_2^2 - 0,3844 \cdot x_3^2 - 0,0327 \cdot x_1 - 0,0392 \cdot x_2 + 0,1408 \cdot x_3 - 0,0372 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,0039 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,0481 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (4)$$

На підставі результатів дисперсійного аналізу за величиною та знаком коефіцієнтів регресії із математичної залежності (4) можна зробити такий висновок: для гасіння комбінованих пожеж за наявності легких металів найбільший вплив на інтенсивність подавання вогнегасного

порошку має амофос (фактор x₃) та хлорид натрію (NaCl / KCl, фактор x₁). Найбільш впливовою є взаємодія факторів x₂·x₃, після неї – взаємодія x₁·x₂. Збільшення величини цих факторів до значень, що наближаються до максимальних, забезпечує найкращу інтенсивність подавання вогнегасного порошку.

Порушення взаємозв'язку між ними різко погіршує інтенсивність подавання вогнегасного порошку.

У натуральних змінних математичні залежності для відображення змін інтенсивності подавання вогнегасного порошку мають вигляд:

$$lgI = -0,4589 - 0,3227(7,27lgA - 12,84)^2 - 0,324(4,19lgB - 5,19)^2 - 0,3844(3,82lgB - 4,35)^2 - 0,0327(7,27lgA - 12,84) - 0,0392(4,19lgB - 5,19) + 0,1408(3,82lgB - 4,35) - 0,0372(7,27lgA - 12,84) \cdot (4,19lgB - 5,19) - 0,0039(7,27lgA - 12,84) \cdot (3,82lgB - 4,35) + 0,0481 \cdot (4,19lgB - 5,19) \cdot (3,82lgB - 4,35)$$

$$I = 10^{lgI} \quad (5)$$

На підставі аналізу даних експериментальних досліджень, рівняння регресії і графічних залежностей встановлено, що оптимальну інтенсивність подавання вогнегасного порошку для гасіння комбінованих пожеж за наявності легких металів можна забезпечити за такого співвідношення компонентів порошку: $A = 60\%$; $B = 20\%$; $C = 17,5\%$.

Отримана рецептура порошку апробована під час гасіння пожеж класів А та В на модельних вогнищах, що підтверджує її комбіновану вогнегасну здатність [17].

Висновки та напрями подальших досліджень. З огляду на те, що пожеж одного класу D не буває, а зазвичай стаються пожежі класу D з виникненням надалі пожеж класів А, В або, навпаки, – пожежі легкозаймистих речовин (ЛЗР) або твердих горючих матеріалів, а потім – пожежі легких металів, пошук та дослідження нових складів вогнегасних речовин комбінованої дії є перспективами з погляду теоретичних та експериментальних досліджень.

Аналіз публікацій та літературних джерел показав, що на сьогодні немає вогнегасних речовин, які б забезпечили ефективне гасіння комбінованих пожеж і

були призначені для гасіння пожеж класів А, В та D.

Проведено експериментальні дослідження окремих хімічних складників вогнегасних порошків для гасіння пожеж класу D та встановлено, що ефективними хімічними речовинами є хлорид натрію, мелений шлак та амофос.

Виконано лабораторні дослідження вогнегасних сумішей, які складаються з натрію хлориду, амофосу, меленого шлаку та аеросилу / стеарату цинку та визначено параметри гасіння.

Встановлено оптимальне співвідношення складників вогнегасного порошку, які забезпечують оптимальну величину інтенсивності подавання. Таким складом є: амофос – 17,5%, NaCl – 60%, мелений шлак – 20%, аеросил / стеарат цинку – 2,5%.

Отримані експериментальні результати підтверджені математичним моделюванням з використанням матриць дробових факторних експериментів 2-го порядку, які адекватно описують зв'язок між технологічними параметрами процесу пожежогасіння та параметрами оптимізації, зокрема інтенсивністю подавання вогнегасного порошку для гасіння легких металів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ковалишин В. В., Мірус О. Л., Марич В. М., Ковалишин Вол. В., Лозинський Р. Я. Проблеми гасіння магнію та його сплавів. *Збірник наукових праць. Пожежна безпека*. Львів. 2016. № 28. С. 58–63.
2. Ковалишин В. В., Петровський В. Л., Веселівський Р. Б., Марич В. М., Ковалишин Вол. В., Великий Н. Р. Аналіз та проблеми гасіння комбінованих пожеж за наявності легких металів чи фосфорних сполук. *Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення*: матеріали всеукраїнської наук.-практич. конференції з міжнародною участю, Львів, 1 жовт. 2022. Львів: ЛДУБЖД, 2022. С. 303–305.
3. Налимов В. В., Голикова Т. И. Логические основания планирования эксперимента. М.: МГУ, 1971. 72 с.
4. Тихомиров В. Б. Планирование и анализ эксперимента. М.: Легкая индустрия, 1974. 262 с.

5. Душинский В. В., Пуховский Е. С., Радченко С. Г. Оптимизация технологических процессов в машиностроении. Київ : Техніка, 1977. 176 с.
6. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей (справочное издание) / Р. З. Бродский и др. М.: Металлургия, 1982. 752 с.
7. Wilson C., Plugge M. and Zallen D. Evaluation of Existing: Phase 1. Agents Extinguishing Agent for Magnesium Fire / New Mexico Engineering and Research Institute Report prepared for Air Force Engineering and Services Center. Tyndall Air Force Base, 1983. P. 3–24.
8. Ковалишин В. В., Марич В. М., Кирилів Я. Б. та ін. Дослідження хімічних речовин як складників вогнегасних порошків для гасіння легких металів. *Збірник наукових праць. Пожежна безпека*. Львів. 2016. № 29. С. 46–56.
9. Баланюк В. М., Ковалишин В. В., Козяр Н. М. Запобігання займання газових сумішей n-гептану комбінованими системами ударних хвиль та об'ємних вогнегасних речовин. *ScienceRise*. 2017. № 11(40). С. 21–24.
10. Ковалишин В. В., Кріса І. Я., Васильєва О. Е., Кирилів Я. Б. Основи експлуатації вогнегасників : навч. посіб. Львів : Сполом, 2011. 304 с.
11. Антонов А. В., Боровиков В. О., Орел В. П., Жартовський В. М., Ковалишин В. Вогнегасні речовини : посіб. Київ : 2004. 171 с.
12. Методичний посібник з питань експлуатації та застосування вогнегасників. Київ : Основа, 1997. 149 с.
13. Антонов А. В., Стилик І. Г. Методи випробувань вогнегасних порошків з визначення їх вогнегасної здатності за класом пожежі D. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. Київ, 2013. № 2(28). С. 242–248.
14. Ковалишин В. В., Марич В. М., Гусар Б. М. та ін. Обґрунтування методики випробувань вогнегасних порошків спеціального призначення. *Збірник наукових праць. Пожежна безпека*. Львів. 2018. № 33. С. 53–59. doi : 10.32447/20786662.33.2018.07.
15. Вогнегасний порошок для гасіння легких металів, електроустановок під напругою за наявності магнію, алюмінію та їх сплавів / В. В. Ковалишин, В. М. Марич, Вол. В. Ковалишин, Б. М. Гусар, Я. Б. Кирилів. Пат. на винахід 124876 Україна : МПК (2021.01), A62D 1/00 № а 2018 01936; заявл. 26.02.2018; опубл. 08.12.2021. Бюл. № 49. 4 с.
16. Вогнегасний порошок спеціального призначення для комбінованого гасіння пожеж класу D, А, В / В. В. Ковалишин, Б. М. Гусар, В. М. Марич, Вол. В. Ковалишин. Пат. на корисну модель 145068 Україна : МПК (2020.01), A62D 1/00 № u 2019 11577; заявл. 02.12.2019; опубл. 25.11.2020. Бюл. № 22. 3 с.
17. Звіт науково-дослідної роботи «Вдосконалення технології гасіння комбінованих пожеж за наявності легких металів чи фосфорних сполук», виконавці : В. В. Ковалишин, Р. Б. Веселівський, В. М. Марич, Вол. В. Ковалишин, В. Л. Петровський, П. В. Пастухов, Н. Р. Великий ; номер державної реєстрації № 0122U200807. Львів : ЛДУБЖД, 2023. 123 с.

REFERENCES

1. Kovalysh, V. V., Mirus, O. L., Marych, V. M., Kovalyshyn, Vol. V., Lozinsky, R. Ya. Problemy (2016) Hasinnia mahnniiu ta yoho splaviv [The problems of magnesium and its alloyextinguishing] Pozhezhna bezpeka, 28. P. 55–62. [in Ukrainian].
2. Kovalyshyn, V. V., Petrovskiy, V. L., Veselivskiy, R. B., Marych, V. M., Kovalyshyn, Vol. V., Velykyi, N. R. Analysis and problems of extinguishing combined fires in the presence of light metals or phosphorus compounds. Actual problems of fire safety and prevention of emergencies in today's conditions: materials of the All-Ukrainian scientific and practical conference with international participation, Lviv, 1 october 2022. Lviv: LSULS, 2022. P. 303–305.
3. Nalymov, V. V., Holykova, T. Y. (1971) *Lohycheskye osnovanyia planirovaniia eksperymenta* [Logical bases for planning an experiment]. Moscow: MSU. [In Russian].
4. Tykhomirov, V. B. (1974) *Planirovaniye y analiz eksperymenta* [Planning and analysis of the experiment]. Moscow: Light industry. [In Russian].
5. Dushynskiy, V. V., Pukhovskiy, E. S., Radchenko, S. H. (1977) *Optymyzatsiya tekhnolohicheskikh protsessov v mashynostroenii* [Optimization of technological processes in mechanical engineering]. Kyiv: Technique. [In Russian].
6. Brodsky, R. Z., et al. (1982) *Tablytsy planov eksperymenta dlia faktornykh y polynomyalnykh modelei (spravochnoe izdanye)* [Tables of experiment plans for factor and polynomial models (reference edition)]. Moscow: Metallurgy. [In Russian].
7. Wilson, C., Plugge, M. and Zallen, D. Evaluation of Existing: Phase 1. Agents Extinguishing Agent for Magnesium Fire / New Mexico Engineering and Research Institute Report prepared for Air Force Engineering and Services Center. Tyndall Air Force Base, 1983. P. 3–24.
8. Kovalyshyn, V. V., Marych, V. M., Kyryliv, Ya. B., Koshelenko, V. V., Mirus, O. L. (2016) *Doslidzhennia khimichnykh rehovyn yak skladnykiv vohnehasnykh poroshkiv dlia hasinnia lehkykh metaliv* [Research of the chemicals usable in fireextinguishing powder for light metal fires extinguish] Pozhezhna bezpeka, 29. P. 46–56. [in Ukrainian].
9. Balaniuk, V. M., Kovalyshyn, V. V., Koziar, N. M. (2017) *Zapobihannia zaimannia hazovykh sumishei n-heptanu kombinovanyimi systemamy udarnykh khvyli ta obiemnykh vohnehasnykh rehovyn* [Prevention of ignition of n-heptane gas mixtures by combined systems of shock waves and bulk extinguishing agents]. ScienceRise, 11(40). P. 21–24. [in Ukrainian].
10. Kovalyshyn, V. V., Krisa, I. Ya., Vasylieva, O. E., Kyryliv, Ya. B. (2011) *Osnovy ekspluatatsii vohnehasnykh* [Basic operation of fire extinguishers]. Lviv: Spolom [in Ukrainian].
11. Antonov, A. V., Borovykov, V. O., Orel, V. P., Zhartovskiy, V. M., Kovalyshyn, V. V. (2004) *Vohnehasni rehovyny* [Fire extinguishing agents]. Kyiv. [in Ukrainian].
12. *Metodychnyi posibnyk z pytan ekspluatatsii ta zastosuvannia vohnehasnykh* [Methodical guide on the operation and use of fire extinguishers] (1997). Kyiv: Osnova. [In Ukrainian].
13. Antonov, A. V., Stylyk, I. H. (2013) *Metody vyprobuvan vohnehasnykh poroshkiv z vyznachennia yikh vohnehasnoi zdatnosti za klasom pozhezh D* [Test methods for fire extinguishing powders to determine their fire extinguishing capacity according to fire class D]. Naukovyi visnyk UkrNDIPB, № 2(28). P. 242–248. [In Ukrainian].

14. Kovalyshyn, V. V., Marych, V. M., Gusar, B. M., Navaliany, V. I., Feduk, Ya. I. (2018) Obhruntuvannia metodyky vyprobuvan vohnehasnykh poroshkiv spetsialnoho pryznachennia [Justification of dry chemical powders testing procedure]. Pozhezhna bezpeka, 33. P. 53–59. [in Ukrainian]. doi: 10.32447/20786662.33.2018.07.
15. Kovalyshyn, V. V., Marych, V. M., Kovalyshyn, Vol. V., Husar, B. M., Kyrlyv, Ya. B. Vohnehasnyi poroshok dlia hasinnia lehkykh metaliv, elektroustanovok pid napruhoiu za naiavnosti mahniiu, aliuminiu ta yikh splaviv [Fire extinguishing powder for extinguishing light metals, electrical installations under voltage in the presence of magnesium, aluminum and their alloys]. Patent UA, no. 124876.
16. Kovalyshyn, V. V., Husar, B. M., Marych, V. M., Kovalyshyn, Vol. V. Vohnehasnyi poroshok spetsialnoho pryznachennia dlia kombinovanoho hasinnia pozhezh klasu D, A, B [Special purpose fire extinguishing powder for combined extinguishing of fires of class D, A, B]. Patent UA, no. 145068.
17. Report of the research work (2023) «Vdoskonalennia tekhnolohii hasinnia kombinovanykh pozhezh za naiavnosti lehkykh metaliv chy fosfornykh spoluk» [Improving the technology of extinguishing combined fires in the presence of light metals or phosphorus compounds], performers: Kovalyshyn V. V., Veselivskyi R. B., Marych V. M., Kovalyshyn Vol. V. Petrovskyi V. L., Pastukhov P. V., Velykyi N. R., state registration number № 0122U200807. Lviv: LSULS . 123 p.

OPTIMIZATION OF THE FORMULATION OF SPECIAL-PURPOSE FIRE EXTINGUISHING POWDER FOR COMBINED EXTINGUISHING OF CLASS A, B AND D FIRES

V. Kovalyshyn, V. Marych, R. Veselivskyi, Vol. Kovalyshyn, V. Chernetskyi

Lviv State University of Life Safety, Ukraine

KEYWORDS: **ANNOTATION**

extinguishing powder, fire class, combined fire, fractional factorial experiment, optimal ratio.

The process of extinguishing class D fires (in the presence of light metal compounds) and class A, B fires is relevant both in wartime and in peacetime. The main danger of fires of this class is magnesium, aluminum and their alloys, which are used both in civilian industry and in the military in the manufacture of incendiary grenades. Given the hazards of metal combustion and the possibility of combined fires, the search for and research of new compositions of extinguishing agents with combined action is an urgent task. Fire tests of fire extinguishing powders for extinguishing magnesium alloys were carried out and it was found that NaCl, KCl, ground slag, ground ash are the most effective. It has been substantiated that fires in the presence of light metals are also accompanied by the burning of lubricants, grease and solid combustibles, and therefore it is advisable to add ammophos and components to the fire extinguishing powder formulation that will dust the extinguishing mixture and ensure its fluidity. Optimal fire extinguishing characteristics of powders of different formulations for extinguishing light metals are determined. The influence of the optimal composition of fire extinguishing powder on the fire extinguishing process was studied according to the plan matrices compiled on the basis of the theory of planning multifactorial experiments. Experimental studies of individual chemical components of fire extinguishing powders for extinguishing class D fires were carried out and it was found that sodium chloride, ground slag and ammophos are effective chemicals. Laboratory tests of fire extinguishing mixtures consisting of sodium chloride, ammophos, ground slag and aerosil, zinc stearate were performed and extinguishing parameters were determined. It was found that the optimal ratio of fire extinguishing powder components that provide the optimal value of the supply intensity is: ammophos – 17,5%, NaCl – 60%, ground slag – 20%, aerosil/zinc stearate – 2,5%. The obtained experimental results are confirmed by mathematical modeling using matrices of fractional factorial experiments of the 2nd order.

УДК 699.812.2

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВІТЧИЗНЯНОЇ ТА ЄВРОПЕЙСЬКОЇ ПОЖЕЖНИХ КЛАСИФІКАЦІЙ БУДІВЕЛЬНОЇ ПРОДУКЦІЇ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2.135-152>

Хроменков Д. Г.*, ORCID iD 0000-0003-2662-6338

Кравченко Р. І., ORCID iD 0000-0003-1410-4567

Ільченко Н. М., ORCID iD 0000-0002-9911-3237

Корольова О. Г., ORCID iD 0009-0002-0592-8089

Гулик Ю. Б. ORCID iD 0000-0003-4633-1369

E-mail: khromen1990@gmail.com

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 08.10.2023

*Пройшла рецензування:
16.11.2023*

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

пожежна класифікація, будівельна продукція, будівельна конструкція, суттєва пожежна характеристика, реакція на вогонь.

АНОТАЦІЯ

Актуальність роботи пов'язана з вирішенням проблеми усунення невідповідності між європейською та вітчизняною пожежними класифікаціями будівельної продукції. Проблемою запровадження європейської пожежної класифікації (далі ЄПК) будівельної продукції в Україні є брак даних щодо узгодження такої продукції, виготовленої вітчизняними виробниками, з вимогами європейських стандартів, нестача відповідного випробувального устаткування в лабораторіях України та суттєві відмінності між вітчизняною та європейською пожежними класифікаціями будівельних матеріалів, виробів та конструкцій. З огляду на результати аналітичних досліджень і порівняльний аналіз європейського та національного досвіду щодо особливостей використання пожежної класифікації будівельної продукції визначено категорії, групи і види будівельної продукції та суттєві пожежні характеристики засобів протипожежного захисту будівель. Зокрема, обґрунтовано властивості суттєвої пожежної характеристики будівельної продукції, класи щодо її реакції на вогонь та критерії показників вогнестійкості. Проведений аналіз щодо реалізації пожежної класифікації будівельної продукції дає більш чітку картину стосовно впровадження ЄПК, а головне – ухвалення концепції з проведення подальшої адаптації та реалізації ЄПК у національних нормативних документах. На підставі зазначеного актуальним є розкриття взаємозв'язку між класами, показниками і критеріями оцінки пожежної небезпеки будівельної продукції, встановленими в українських та європейських нормативних документах.

Постановка проблеми. У межах європейської інтеграції в Україні ухвалено Технічний регламент будівельної продукції [1], який розроблено на основі Регламенту (ЄС) № 305/2011 (далі – CPR) [2]. Згідно з CPR також визначено категорії (сферу) будівельної продукції [3] та суттєві пожежні характеристики, які стосуються більшості її видів [4], а саме: реакція на вогонь, вогнестійкість, стійкість до зовнішнього вогневого впливу. На

сьогодні здійснюються заходи щодо ухвалення європейських актів і стандартів як національних стандартів України, в яких визначені пожежні показники, їхні критерії, порогові рівні та класи, пов'язані з такими суттєвими (експлуатаційними) характеристиками. Із введенням зазначених нормативних документів мають бути скасовані конфліктні національні стандарти.

Основною метою введення європейських технічних регламентів та стандартів є усунення технічних бар'єрів у торгівлі. Водночас її реалізація без проведення відповідних досліджень не унеможливило б зниження в Україні рівня пожежної безпеки будівельної продукції та об'єктів будівництва, на яких така продукція використовується. Пов'язано це з відмінностями у вимогах пожежної безпеки національних стандартів України, європейських та міжнародних.

На сьогодні ЄПК відрізняється від вітчизняної пожежної класифікації як за методами визначення показників пожежної небезпеки будівельних матеріалів, так і за критеріями, згідно з якими визначають відповідні групи цих показників.

Нині в Україні впроваджено методом підтвердження ДСТУ EN 13501-1:2016 (EN 13501-1:2007+A1:2009, IDT) Пожежна класифікація будівельних виробів і будівельних конструкцій. Частина 1. Класифікація за результатами випробувань щодо реакції на вогонь [5].

В Європейському Союзі розроблено нову редакцію EN 13501-1:2018 [6], який в Україні не впроваджений.

Для вирішення цієї проблеми необхідно вітчизняну пожежну класифікацію будівельної продукції гармонізувати з європейською за допомогою проведення наукових досліджень проблем, пов'язаних із неузгодженістю європейської та вітчизняної пожежними класифікаціями будівельної продукції.

Унаслідок цього актуальним є проведення порівняльного аналізу вимог національних нормативних документів щодо пожежної безпеки будівельної продукції з європейськими та міжнародними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В Україні вимоги пожежної безпеки до будівельної продукції (у тому числі до кабелів) встановлено в ДБН В.1.1-7 [7], ДСТУ 4809 [8] та стандартах серії ДСТУ EN 13501 (частини 2, 3).

У державних будівельних нормах визначено класифікацію будівельної продукції за реакцією на вогонь з використанням методів випробування, встановлених у національних стандартах України, та надано орієнтовне порівняння вітчизняної пожежної класифікації будівельних матеріалів для облицювання стін та стель з європейською. Таке порівняння здійснено на підставі роботи [9].

У національному стандарті [8] визначено класифікації кабелів за реакцією на вогонь та вогнестійкістю з використанням методів випробування, розроблених на основі стандартів Міжнародної електротехнічної комісії (IEC) та Німецького інституту зі стандартизації (DIN). Такі класифікації запропоновано з огляду на роботи [10].

Наприклад, у дослідженні [9] також висвітлено, що викладена в ДБН В.1.1-7 [7] пожежно-технічна класифікація будівельних матеріалів відрізняється від європейської, яка встановлена в EN 13501-1 [5], зокрема тим, що згідно з європейською класифікацією будівельні вироби та/або матеріали поділяються на три групи: будівельні та оздоблювальні матеріали, за винятком покриття підлоги і матеріалів, призначених для ізоляції труб; покриття підлоги; матеріали, призначені для ізоляції труб.

Кожна група будівельних виробів та/або матеріалів поділяється на сім основних класів пожежної небезпеки: A1, A2, B, C, D, E, F, які визначають

відповідно за методами, наведеними в EN ISO 1716 [11], EN ISO 1182 [12], EN ISO 9239-1 [13], EN ISO 13823 [14], EN ISO 11925-2 [15].

Водночас у ДБН В.1.1-7 [7], у довідковому додатку Б, наведено орієнтовне порівняння вітчизняної пожежної класифікації будівельних матеріалів з ЄПК, яке має бути уточнено через проведення цих досліджень.

Також нову редакцію ДБН В.1.1-7 [7] доповнено посиланням на ДСТУ 4809 [8], відповідно до якого виконують визначення показників пожежної небезпеки до відповідних класів електричних та оптичних ізолюваних проводів і кабелів з віднесенням проводів.

З огляду на ці дослідження основною метою роботи залишається аналізування нових вимог європейських (міжнародних) нормативних документів щодо пожежної класифікації будівельних матеріалів та виявлення шляхів адаптації вимог національної пожежної класифікації будівельних матеріалів до вимог ЄПК.

Виклад основного матеріалу.

Однією з важливих властивостей суттєвої пожежної характеристики будівельної продукції є її реакція на вогонь, яка визначається такими показниками, як [16]:

- 1) займистість і горючість [17];
- 2) поширення полум'я [18];
- 3) тепловиділення [19];
- 4) димоутворення (димоутворювальна здатність) [20];
- 5) токсичність летких продуктів згоряння [21];
- 6) корозійна активність летких продуктів згоряння [22].

Кожну із зазначених властивостей

виражають відповідними показниками, їхніми критеріями та класами реакції на вогонь.

В Україні обов'язкові вимоги щодо класифікації за реакцією на вогонь будівельної продукції (будівельних матеріалів) установлено у ДБН В.1.1-7 [7].

Для будівельної продукції (крім кабелів) класифікацію за реакцією на вогонь визначено в додатку А до цих державних будівельних норм та наведено в табл. 1. У табл. 1 наведено групи будівельних матеріалів за поширенням полум'я поверхнею, які визначають для поверхневих шарів конструкцій покрівель, підлог, зокрема килимових покриттів [23]. Стандарти на методи випробування [24–25] розроблено на основі міжнародних стандартів ISO 5657:1986 та ISO 9239-1:1997. На заміну цих стандартів затверджено нові редакції ISO 5657 [26] та ISO 9239-1 [13]. Водночас метод [25] включає суттєві модифікації, порівняно з методом [13]. Для оцінювання реакції на вогонь фасадів та їхнього облицювання, зокрема теплоізоляційного, можливе застосування більш масштабних методів випробування згідно з ДСТУ Б В.1.1-21 [27], ДСТУ Б В.1.1-22 [28], ДСТУ 9072 [29].

Перші два національні стандарти [27–28] розроблено на основі міжнародних стандартів ISO 13785 [30–31].

В Україні для випробування фасадів переважно застосовують метод відповідно до ДСТУ 9072 [29].

Згідно з дорученнями [32–33] для теплоізоляційної та іншої будівельної продукції, що може тривало тліти (жевріти), має додатково встановлюватися показник тління, який визначають згідно з EN 16733 [34].

Таблиця 1 – Українська класифікація будівельних матеріалів за реакцією на вогонь [7]

Клас або група	Методи випробування	Критерії показника
За горючістю згідно з 6.1 ДСТУ 8829 [23] (ДСТУ Б В.2.7-19-95): НГ – негорючі Г – горючі: Г1 – низької горючості Г2 – помірної горючості Г3 – середньої горючості Г4 – підвищеної горючості	7.1 ДСТУ 8829 [23] ДСТУ EN ISO 1182 [12] ДСТУ EN ISO 1716 [11] 7.4 ДСТУ 8829 [23]	$\Delta T \leq 30$ $\Delta m \leq 50$ $t_f = 0$ $PCS \leq 2,0$ $T \leq 135$ $S_L \leq 65$ $S_m \leq 20$ $t_{af} = 0$ $T \leq 235$ $S_L \leq 85$ $S_m \leq 50$ $t_{af} \leq 30$ $T \leq 450$ $S_L > 85$ $S_m \leq 50$ $t_{af} \leq 300$ с $T > 450$ $S_L > 85$ $S_m > 50$ $t_{af} > 300$
За займистістю згідно з 6.17 ДСТУ 8829 [23]: В1 – важкозаймисті В2 – помірнозаймисті В3 – легкозаймисті	ДСТУ Б В.1.1-2 [24]	$Q_{cr} \geq 35$ $20 \leq Q_{cr} < 35$ $Q_{cr} < 20$
За поширенням полум'я поверхнею згідно з 6.18 ДСТУ 8829 [23]: РП1 – не поширюють РП2 – локально поширюють РП3 – помірно поширюють РП4 – значно поширюють	ДСТУ Б В.2.7-70 [25]	$Q_{cr} \geq 11$ кВт/м ² $8 \leq Q_{cr} < 11$ $5 \leq Q_{cr} < 8$ $Q_{cr} < 5$
За димоутворювальною здатністю згідно з 6.14 ДСТУ 8829 [23]: Д1 – з малою димоутворювальною здатністю Д2 – з помірною димоутворювальною здатністю Д3 – з високою димоутворювальною здатністю	7.19 ДСТУ 8829 [23] (ГОСТ 12.1.044-89)	$D_m \leq 50$ $D_m \leq 500$ $D_m > 500$
За токсичністю продуктів горіння згідно з 6.16 ДСТУ 8829 [23]: Т1 – малонебезпечні Т2 – помірнонебезпечні Т3 – високонебезпечні Т4 – надзвичайно небезпечні	7.21 ДСТУ 8829 [23] (ГОСТ 12.1.044-89)	$H_{CL50} > 120$ $40 < H_{CL50} \leq 120$ $13 < H_{CL50} \leq 40$ $H_{CL50} \leq 13$
ΔT – підвищення температури, °С або К; Δm – втрата маси, %; t_f – тривалість (стійкого) полум'яного горіння, с; PCS – вища (масова) теплота згорання, МДж/кг; T – температура газоподібних продуктів горіння, °С; S_L – ступінь пошкодження за довжиною, %; S_m – ступінь пошкодження за масою, %; t_{af} – тривалість самостійного горіння, с; Q_{cr} – критична поверхнева щільність (густина) теплового потоку, кВт/м ² ; D_m – коефіцієнт димоутворення, м ² /кг; H_{CL50} – показник токсичності продуктів горіння, г/м ³		

Відповідно до EN 1794-3 [35] реакцію на вогонь шумозахисних пристроїв для автодорожніх тунелів або загального призначення додатково оцінюють за такими показниками, як максимальна густина диму (впродовж 10 хв) та вихід токсичних газів (впродовж 10 хв). Вимірюють вихід таких газів: CO, HCN, HCl, NOx. Зокрема, мають виконуватися такі умови: $Y_{CO} \leq 420$ мг/г, $Y_{HCN} \leq 95$ мг/г. Для вимірювання зазначених показників застосовують метод згідно з ISO 5659-2 [36], який введено як європейський стандарт, в умовах впливу густини теплового потоку 25 кВт/м^2 і пілотованого полум'я.

Водночас у стандартах [35–36] вимоги щодо випробувального

устаткування для вимірювання токсичних газів викладено загально. Отже, для випробування на токсичність можуть бути використані відповідні вимоги щодо випробувального обладнання згідно з EN 17084 [37].

Для оцінювання реакції на вогонь шумозахисних пристроїв, призначених для використання в інших, ніж для загального призначення, цілях, автодорожніх тунелів, часткового покриття на мостах та поблизу будинків застосовують класифікацію за стійкістю до горіння порослі.

Класифікацію за реакцією на вогонь покриттів для підлоги (див. табл. 2) побудовано на основі міжнародних стандартів [13; 38–40], ухвалених як європейські.

Таблиця 2 – Класи щодо реакції на вогонь покриттів для підлоги [2; 32]

Клас	Методи випробування	Класифікаційні критерії показників	Додаткова класифікація
A1 _п	EN ISO 1182 ^{a)}	$\Delta T \leq 30$ $\Delta m \leq 50$ $t_f = 0$	–
	EN ISO 1716	$PCS \leq 2,0$ ^{a)} $PCS \leq 2,0$ ^{b)} $PCS_a \leq 1,4$ ^{d)} $PCS \leq 2,0$ ^{e)}	–
A2 _п	EN ISO 1182 ^{a)}	$\Delta T \leq 50$ $\Delta m \leq 50$ $t_f \leq 20$	–
	EN ISO 1716	$PCS \leq 3,0$ ^{a)} $PCS_a \leq 4,0$ ^{b)} $PCS_a \leq 4,0$ ^{d)} $PCS \leq 3,0$ ^{e)}	–
	EN ISO 9239-1 ^{j)}	$CHF \geq 8,5 \text{ кВт/м}^2$ ^{k)}	Димоутворювальна здатність ^{f)}
B _п	EN ISO 11925-2 ⁱ⁾ (тривалість прикладання джерела полум'я 15 с)	$F_s \leq 150$ (тривалість випробування 20 с)	
C _п	EN ISO 9239-1 ^{j)}	$CHF \geq 4,5 \text{ кВт/м}^2$ ^{k)} $CHF \geq 3,0 \text{ кВт/м}^2$ ^{k)}	
	EN ISO 11925-2 ⁱ⁾ (тривалість прикладання джерела полум'я 15 с)	$F_s \leq 150$ (тривалість випробування 20 с)	
D _п	EN ISO 11925-2 ⁱ⁾ (тривалість прикладання джерела полум'я 15 с)	$F_s \leq 150$ (тривалість випробування 20 с)	–
E _п		$F_s > 150$ (тривалість випробування 20 с)	–
F _п			–

Клас	Методи випробування	Класифікаційні критерії показників	Додаткова класифікація
^{f)} Належить до класу s1, якщо $100 \int_0^t OD \, dt \leq 750 \, \% \cdot \text{хв}$, де OD – оптична густина диму; t – тривалість випробування, хв; до класу s2, якщо не належить до класу s1. ^{j)} Тривалість випробування становить 30 хв. ^{k)} CHF – критична щільність густини теплового потоку, кВт/м ² . Це густина теплового потоку, за якого полум'я згасає або густина теплового потоку після 30 хв випробування залежно від того, що менше (тобто густина теплового потоку відповідна поширенню полум'я на найбільшу відстань). Інші умовні позначення показників та інші виноски – згідно з табл. 5. Примітка. EN ISO 1182, EN ISO 1716, EN ISO 11925-2, EN ISO 9239-1 є ідентичними з ISO 1182 [38], ISO 1716 [39], ISO 11925-2 [31], ISO 9239-1 [13].			

Також на основі міжнародних стандартів [38–40] визначено класи реакції на вогонь A1, A2, E, F, A1L, A2L, EL, FL, Aca. Але для кабелів не застосовують ISO 1182 [12] через технічну проблему з підготовкою зразків.

Для кабелів класи реакції на вогонь Eca, Fca визначено на основі міжнародного стандарту IEC 60332-1-2 [41].

Для визначення інших класів за реакцією на вогонь для будівельної продукції основним є метод SBI, що імітує одинично палаючий предмет [42]. Згідно з [35] такий метод має забезпечувати обов'язкові умови випробування відповідно до Рішення Комісії 98/457/ЄС [44].

Метод випробування, що імітує одинично палаючий предмет, розроблено групою офіційних європейських пожежних лабораторій під керівництвом групи пожежних регуляторів Європейської Комісії та опубліковано вперше у 2002 році. Цей метод упроваджено в EN 13823 [14]. З метою закріплення зразків для випробування будівельної продукції з різною формою рекомендовано користуватися способами, визначеними в нормативних документах [45–47].

Для класифікації будівельної продукції, зокрема прямолінійної трубчастої теплоізоляційної продукції згідно з [48], вибрано еталонний метод випробування RC (кімнатний кут) згідно з ISO 9705-1 [49] або EN 14390 [50].

Із застосуванням еталонного методу

[49] проведено дослідження [51–52] та на підставі порівняльного аналізу результатів, отриманих із використанням основного методу [14], визначено класифікаційні критерії для класів B, C, D, BL, CL та DL.

Для визначення належності кабелів до класів за реакцією на вогонь B1ca, B2ca, Cca, та Dca основними є методи випробування згідно з EN 50399 [53]. Такі методи розроблено на основі експериментальних досліджень із застосуванням горизонтального і вертикального довідкових сценаріїв [54], а також за інформацією з цього та інших джерел [55–56] – IEC 60332-3 [57–59], EN 50289-4 [60–61], EN 13823 [14] і американських стандартів (UL, NFPA).

В ЄС не вирішеними залишаються такі проблеми [41]:

- 1) не визначено еталонний метод випробування сендвіч-панелей з металевим покриттям, зокрема на основі ISO 13784 [62–63];
- 2) не визначено єдиний еталонний метод випробування фасадів;
- 3) не визначено класифікацію за токсичністю летких продуктів згоряння [64].

За результатами дослідження [65] із застосуванням еталонного методу за ISO 9705-1 [56] та засобів вимірювання токсичних газів за ISO 16405 [66] запропоновано для оцінки токсичності летких продуктів згоряння використовувати метод за ISO/TS 19700 [67].

Порівняння української та європейської класифікацій будівельної продукції за реакцією на вогонь надано в ДБН В.1.1-7 [5]. Але через те, що для оцінки реакції на вогонь використовують різні показники та критерії (порогові рівні), відповідність між класами є орієнтовною.

Зауваженнями до європейських класифікацій будівельної продукції за реакцією на вогонь є те, що ними не обмежено горизонтальне поширення полум'я для класів D і DL та вертикальне поширення полум'я для класів A2 – D, A2L – DL під час випробування згідно з EN 13823 [14].

До європейської класифікації кабелів за реакцією на вогонь є такі зауваження.

Для класу Eca не передбачено оцінку запалювальної здатності часток, що відокремлюються від зразків під час випробування за ДСТУ EN 60332-1-3 [68], та тривалості горіння зразків, як для іншої будівельної продукції класів E та EL. Це впливає на ухвалення рішення щодо віднесення кабелів до додаткових класів d0 або d2. Також не враховано усі критерії оцінки довжини звугленої частини зразків згідно з ДСТУ EN 60332-1-2 [41], що може призвести до невизначеності отриманих результатів у разі поширення полум'я вниз від точки прикладання джерела запалювання. Про такі недоліки класифікації кабелів за реакцією на вогонь зазначено в роботі [69].

Для класу Dca не обмежено довжину поширення полум'я на рівні 2,5 м за умови випробування кабелів, прокладених у пучках, як в серії ДСТУ EN 60332-3 [57–58; 70–71]. Внаслідок цього на

об'єктах будівництва можливе використання кабелів, прокладених у пучках, які необмежено поширюють полум'я.

Для додаткового класу s2 можуть належати кабелі з коефіцієнтом світлопропускання менше ніж 60%, тобто з рівнем димоутворювальної здатності нижчим за рекомендований Міжнародною електротехнічною комісією (IEC) [72]. Також цією організацією із стандартизації внесено зміни до критерію оцінки коефіцієнта світлопропускання [72], які чинні для CENELEC. З огляду на це необхідне проведення відповідних досліджень.

Зауваженням до додаткової класифікації кабелів за корозійною активністю летких продуктів згоряння можна вважати брак критерію оцінки вмісту галогенів (галогеноводнів). Відповідно до ДСТУ EN 50525-1 [73] кабелі класу a2 мають відповідати додатковим критеріям, визначеним у цьому стандарті із застосуванням методів випробування за ДСТУ EN 60754-1 [74] та ДСТУ ІЕС 60684-2 [75]. Після ухвалення ДСТУ ІЕС 60754-3 [76] метод випробування за цим стандартом може бути використаний замість двох зазначених вище методів випробування.

Суттєва характеристика вогнестійкості будівельної продукції визначається відповідними показниками, їхніми пороговими рівнями (межами вогнестійкості), класами та критеріями (граничними станами) [77–80].

Критерії показників вогнестійкості будівельної продукції наведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Критерії показників вогнестійкості будівельної продукції [77–80]

Критерії показників вогнестійкості	Літерне позначення
1 Несуча здатність	R
2 Цілісність	E
3 Ізольовальна (теплоізолювальна) здатність	I
4 Випромінювальна (тепловипромінювальна) здатність	W
5 Стійкість до механічної дії (механічна міцність)	M
6 Здатність до самозачинення	C
7 Стійкість до витoku диму (герметичність, димопроникність)	S
8 Безперервність живлення та/або подавання сигналів (цілісність кіл)	P PH
9 Стійкість до горіння сажі	G O (без стійкості до горіння сажі)
10 Вогнезахисна здатність	K
11 Стійкість за постійної температури	D
12 Стійкість за стандартного температурного режиму	DN
13 Функціональна здатність вентиляційних пристроїв примусового димовидалення	F
14 Функціональна здатність вентиляційних пристроїв природного димовидалення	B
15 Теплостійкість вентиляційних пристроїв димовидалення	V

Європейські стандарти на розрахункові методи (єврокоди) [81–86], а також EN 1991-1-2 [87] розроблено згідно з рекомендаціями [82]. У серії цих європейських стандартів зазначено методи розрахунку механічної міцності елементів для проектування будівельних конструкцій, перевірки їх механічної стійкості та визначення належних розмірів будівельних виробів для виконання основної вимоги № 2 «Пожежна безпека» [89].

В Україні згідно з ДБН В.1.1-7 [7] єврокоди використовують для оцінювання вогнестійкості будинків із конструктивними системами, для яких не можна визначити ступінь вогнестійкості. У цьому разі також можливе використання експериментального методу натурних вогневих випробувань за ДСТУ Б В.1.1-18 [90].

В Україні класифікацію за вогнестійкістю будівельної продукції встановлено в ДБН В.1.2-7 [91], ДСТУ EN 13501-2 [92] та ДСТУ EN 13501-3 [93]. Під час перегляду

зазначених державних будівельних норм із них було вилучено класифікацію будівельних виробів за вогнестійкістю.

Класифікацію будівельної продукції за вогнестійкістю буде повністю адаптовано до європейської з набуттям чинності національних стандартів, що розробляються на основі європейських [94–96].

В ЄС суттєва характеристика поширення вогню стосується навісних фасадів [97] та визначається за такими критеріями:

1) обмеження поширення вогню та диму до суміжних частин споруди впродовж певного проміжку часу відносно однієї або декількох властивостей вогнестійкості;

2) обмеження поширення вогню та диму крізь порожнини в навісній конструкції в місці її примикання на всіх рівнях до плит перекриттів та стін.

Для визначення поширення вогню для фасадів застосовують класи вогнестійкості згідно з EN 13501-2 [94] та метод випробування за EN 1364-4 [98].

В Україні поширення вогню

стосується будівельних конструкцій, підвісних стель, повітроводів, трубопроводів, крім конструкцій заповнення прорізів, покриття підлоги,

покрівлі та облицювання [7]. Класифікацію таких конструкцій залежно від рівнів межі поширення вогню надано в табл. 4.

Таблиця 4 – Українська класифікація будівельних конструкцій за групою поширення вогню [7]

Група	Орієнтація будівельних конструкцій	Допустиме значення межі поширення вогню, м
M0 *	усі	0
M1	горизонтальна вертикальна та похила	$\leq 0,25$ $\leq 0,40$
M2	горизонтальна вертикальна та похила	$> 0,25$ $> 0,40$
* До M0 належать будівельні конструкції з матеріалів класу НГ згідно з табл. 3.		

Для визначення групи поширення вогню застосовують метод випробування згідно з додатком Д до ДБН В.1.1-7 [7].

Залежно від групи поширення вогню та класу вогнестійкості будівельних конструкцій визначають ступінь вогнестійкості будинків згідно з ДБН В.1.1-7 [7].

З ухваленням в Україні європейських стандартів [94; 98] потребує вирішення питання щодо доцільності застосування додаткової національної класифікації щодо поширення вогню.

За інформацією, наведеною в роботі [99], кожний з чотирьох методів випробування згідно з CEN/TS 1187 [100] є незалежним і будь-який з них може бути використаний на території держави-члена ЄС. Встановлено, що перший метод вибраний Німеччиною, Австрією, Бельгією, Польщею, другий метод – скандинавськими країнами, третій – Францією, четвертий – Великобританією.

З метою усунення технічних бар'єрів у торгівлі згідно з дорученнями (мандатами) Комісії ЄС [33; 42–43; 48; 101] європейські організації стандартизації CEN/CENELEC розробили EN 13501-1 [5] та EN 13501-6 [102]. У цих європейських стандартах визначено чотири гармонізовані класифікації будівельної продукції за реакцією на вогонь.

Відповідно до Делегованого Регламенту Комісії (ЄС) 2016/364 вказані європейські стандарти, які визначають такі класифікації, є обов'язковими до виконання.

В Україні попередню редакцію EN 13501-5 затверджено як ДСТУ EN 13501-5:2016. Нині розробляється нова редакція національного стандарту, що відповідатиме останній редакції EN 13501-5 [103]. Європейську технічну специфікацію CEN/TS 1187 [104] ухвалено як національний стандарт України [105].

У роботі [99] запропоновано використання в Україні для класифікації покрівель та покрівельних покриттів другого методу випробування згідно з ДСТУ CEN/TS 1187 [105].

Висновки та напрями подальших досліджень. У класифікації за реакцією на вогонь є суттєва різниця. Проте виникає питання доцільності застосування національної класифікації за займистістю за умови наявності класифікації за горючістю, що своєю чергою призводить до дублювання. Також немає класифікації за токсичністю летких продуктів згоряння. Цю відмінність в класифікації за реакцією на вогонь можливо усунути за допомогою ухвалення нової редакції EN 13501-2.

Експериментально не виявлено кореляції між результатами випробування будівельної продукції на горючість згідно з ДСТУ 8829 і тепловиділення згідно з EN 13823 та поширення полум'я поверхнею згідно з ДСТУ Б В.2.7-70 і ISO 9239-1.

Переважна частина експериментально дослідженої будівельної продукції належить до класів токсичності продуктів горіння T1 та T2, що сприяє подальшому використанню національної класифікації будівельних матеріалів за токсичністю продуктів горіння згідно з ДСТУ 8829.

У європейських та національних вимогах щодо стійкості до поширення вогню є відмінність, тож постає питання доцільності застосування національної класифікації за стійкістю до поширення вогню. Водночас класифікація щодо стійкості до впливу зовнішнього вогню є ідентичною.

З огляду на результати експериментальних досліджень, а також порівняння вимог класифікаційних стандартів [6; 8; 23; 102] доведено, що:

1) європейським класам будівельної продукції A1, A1L, A1FL відповідає національна група негорючих матеріалів;

2) європейським класам будівельної продукції E, F, EL, FFL відповідає національна група Г4;

3) європейським класам покриттів для підлоги EFL, FFL, DFL відповідає національна група поширення полум'я РП4;

4) європейському класу кабельної продукції FCA відповідає національний клас нестійких до поширення полум'я за умови одиничного прокладання кабелю;

5) європейському класу кабельної продукції ECA відповідає національний клас стійких до поширення полум'я за умови одиничного прокладання кабелю;

6) європейському класу кабельної продукції s1b відповідає національний клас ДПк2;

7) європейському класу кабельної продукції a2 відповідає національний клас Кк2.

Результати експериментальних даних покриттів для підлоги не виявили однозначного взаємозв'язку між іншими європейськими та національними класами реакції на вогонь. Пов'язано це з невідповідністю стандартизованих умов випробування, які в Україні є застарілими порівняно зі встановленими в європейських стандартах.

Насамперед основною проблемою у реалізації нової пожежної класифікації є брак відповідної випробувальної бази, оскільки це стримує процес перегляду національних будівельних норм та правил пожежної безпеки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про надання будівельної продукції на ринку : Закон України від 02.09.2020 р. № 850-IX. *Голос України*. 2020. № 183.
2. Regulation (EU) No 305/2011 of the European Parliament and of the Council of 9 March 2011 laying down harmonised conditions for the marketing of construction products and repealing Council Directive 89/106/EEC – OJ L 88, 4.4.2011, p. 5–43. URL : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32011R0305> (дата звернення : 03.10.2023).
3. Про затвердження переліку категорій будівельної продукції : постанова Кабінету Міністрів України від 28.04.2021 р. № 426. *Урядовий кур'єр*. 2021. № 84.
4. Деякі питання надання будівельної продукції на ринку : постанова Кабінету Міністрів України від 23.12.2021 р. № 1458. *Урядовий кур'єр*. 2022. № 19.
5. ДСТУ EN 13501-1:2016. Пожежна класифікація будівельних виробів і будівельних конструкцій. Ч. 1. Класифікація за результатами випробувань щодо реакції на вогонь (EN 13501-1:2007+A1:2009, IDT). Чинний від 2016-09-01. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2016.
6. EN 13501-1:2018 Fire classification of construction products and building elements – Part 1 : Classification using data from reaction to fire tests [Document published on: 2019-01-14]. Brussels : CEN, 2019. 58 p.
7. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. [Чинний від 2017-06-01]. Вид.офіц. Київ : Мінрегіон України, 2016. 39 с. Державні будівельні норми.

8. ДСТУ 4809:2007 Ізольовані проводи та кабелі. Вимоги пожежної безпеки та методи випробування. [Чинний від 2008-01-01]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2008. 19 с.
9. Ніжник В. В., Сізіков О.О., Уханський Р. В., Мартюк Д. В., Тищенко О. М. Аналітичні дослідження вимог європейських (міжнародних) нормативних документів щодо пожежної класифікації будівельних матеріалів. *Науковий вісник УкрНДНПБ*. С. 44–49
10. Коваленко В. В. Харченко І. О., Кравченко Р. І., Спіридончев М. О. Визначення пожежної небезпеки ізолюваних проводів і кабелів. *Науковий вісник УкрНДНПБ*. 2005. № 2(12). С. 28–34
11. ДСТУ EN ISO 1716:2019 (EN ISO 1716:2018, IDT; ISO 1716:2018, IDT) Випробування виробів щодо реакції на вогонь. Визначення величини теплоти згоряння (теплотворна здатність) тисків. [Чинний від 2019-19-01]. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2019. 37 с.
12. ДСТУ EN ISO 1182:2016 (EN ISO 1182:2010, IDT) Випробування виробів щодо реакції на вогонь. Випробування на негорючість. [Чинний від 2019-09-01]. Вид. офіц. Київ: УкрНДНЦ, 2019. 42 с.
13. ISO 9239-1:2010 Reaction to fire tests for floorings – Part 1 : Determination of the burning behaviour using a radiant heat source. [Document published on: [2010-06-01]. Geneva : ISO, Edition : 3, 2010. 25 p.
14. EN 13823:2020 Reaction to fire tests for building products – Building products excluding floorings exposed to the thermal attack by a single burning item. [Document published on: 2020-05-31]. Brussels : CEN, 2020. 108 p.
15. ISO 11925-2:2020 Reaction to fire tests – Ignitability of products subjected to direct impingement of flame – Part 2 : Single-flame source test. [Document published on : 2020-02-15] Geneva : ISO, Edition : 4, 2020. 27 p.
16. ISO 13943 : 2017 Fire safety – Vocabulary. [Document published on: 2017-07-03] Geneva : ISO, Edition : 3, 2017. 53 p.
17. IEC 60695-1-20:2016 Fire hazard testing – Part 1–20 : Guidance for assessing the fire hazard of electrotechnical products – Ignitability – General guidance.[Document published on: 2016-01-27]. Geneva : IEC, Edition : 1, 2016. 46 p.
18. IEC 60695-9-1:2016 Fire Hazard Testing – Part 9–1 : Surface Spread Of Flame – General Guidance. [Document published on : 2013-04-01]. Geneva : IEC, Edition : 3, 2013. 11 p.
19. IEC 60695-8-1:2017 Fire hazard testing Heat release. General guidance. [Document published on: 2017-02-28]. Geneva : IEC, Edition : 3, 2017. 32 p.
20. IEC 60695-6-1 : 2021 Fire hazard testing – Part 6–1: Smoke obscuration – General guidance. [Document published on : 2021-08-05] Geneva : IEC, Edition : 3, 2021. 65 p.
21. IEC 60695-7-1:2010 Fire hazard testing – Part 7–1 : Toxicity of fire effluent – General guidance.[Document published on : 2010-06-28] Geneva : IEC, Edition : 3, 2010. 50 p.
22. IEC 60695-5-1:2021 Fire hazard testing – Part 5–1 : Corrosion damage effects of fire effluent – General guidance. [Document published on : 2021-10-28]. Geneva : IEC, Edition : 3, 2010. 38 p.
23. ДСТУ 8829:2019 Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація. [Чинний від 2020-01-01]. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2020. 78 с.
24. ДСТУ Б В.1.1-2-97 (ГОСТ 30402-96) Матеріали будівельні. Метод випробування на займистість. [Чинний від 1998-01-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 1998. 25 с.
25. ДСТУ Б В.2.7-70-98 (ГОСТ 30444-97) Матеріали будівельні. Метод випробування на розповсюдження полум'я. [Чинний від 1999-01-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 1999. 9 с.
26. ISO 5657:1997 Reaction to fire tests – Ignitability of building products using a radiant heat source. [Document published on: 197-12-15]. Geneva : ISO, Edition : 2, 1997. 46 p.
27. ДСТУ Б В.1.1-21:2009 Захист від пожежі. Конструкції зовнішніх стін з фасадною теплоізоляцією. Метод великомасштабних вогневих випробувань (ISO 13785-2:2002, MOD). [Чинний від 2009-08-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2009. 8 с.
28. ДСТУ Б В.1.1-22:2009 Захист від пожежі. Конструкції зовнішніх стін з фасадною теплоізоляцією. Метод середньомасштабних вогневих випробувань (ISO 13785-1:2002, MOD). [Чинний від 2009-08-01]. Видання офіц. Київ : Мінрегіон України, 2009. 17 с.
29. ДСТУ 9072:2021 Конструкції зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією. Метод натурних вогневих випробувань збірних систем фасадної теплоізоляції з опорядженням штукатурками та дрібноштучними елементами на поширення вогню. [Чинний від 2021-01-08]. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2021. 15 с.
30. ISO 13785-1:2002 Reaction-to-fire tests for façades – Part 1 : Intermediate-scale test. [Document published on : 2002-12-01]. Geneva : ISO, Edition : 1, 2002. 10 p.
31. ISO 13785-2:2002 Reaction-to-fire tests for façades – Part 2 : Large-scale test. [Document published on: 2002-12-01]. Geneva : ISO, Edition : 1, 2002. 16 p.
32. Addendum to mandate to cen/cenelec concerning the execution of standardisation work for harmonised standards on M 103 «Thermal Insulation Products» (M/367 EN). URL : <https://law.resource.org/pub/eu/mandates/m367.pdf> (дата звернення : 03.10.2023).
33. Amendment to: horizontal complement m/88 to the mandates to cen/cenelec concerning the execution of standardisation work for the evaluation of construction products in respect of their reaction to fire (M/385 EN). URL : <https://law.resource.org/pub/eu/mandates/m385.pdf> (дата звернення : 03.10.2023).
34. EN 16733:2016 Reaction to fire tests for building products – Determination of a building product's propensity to undergo continuous smouldering. [Document published on : 2016-05-04] Brussels : CEN, Edition : 2, 2016 . 21 p.
35. EN 1794-3:2016 Road traffic noise reducing devices – Non-acoustic performance – Part 3 : Reaction to fire – Burning behaviour of noise reducing devices and classification. [Document published on : 2016-12-01]. Brussels : CEN, Edition : 1, 2016. 15 p.
36. ISO 5659-2:2017 Plastics – Smoke generation – Part 2 : Determination of optical density by a single-chamber test. [Document published on : 2017-05-01]. Geneva : ISO, Edition : 4, 2017. 49 p.
37. EN 17084:2018 Railway applications – Fire protection on railway vehicles – Toxicity test of materials and components. [Document published on: 2018-12-19].Brussels : CEN, Edition : 1, 2018. 44 p.
38. ISO 1182:2020 Reaction to fire tests for products – Non-combustibility test. [Document published on : 2020-06-01]. Geneva : ISO, Edition : 6, 2020. 40 p.
39. ISO 1716:2018 Reaction to fire tests for products – Determination of the gross heat of combustion (calorific value). [Document published on : 2018-05-20].Geneva : ISO, Edition : 4, 2018. 38 p.

40. Commission Delegated Regulation (EU) of 1 July 2015 on the classification of the reaction to fire performance of construction products pursuant to Regulation (EU) No 305/2011 of the European Parliament and of the Council. – OJ L 68, 15.3.2016, p. 4–11. URL : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32016R0364> (дата звернення : 03.10.2023).
41. IEC 60332-1-2:2004+AMD1 : 2015 Tests on electric and optical fibre cables under fire conditions – Part 1–2 : Test for vertical flame propagation for a single insulated wire or cable – Procedure for 1 kW pre-mixed flame.[Document published on : 2015-07-28] Brussels : CEN, 2015. 48 p.
42. Horizontal complement to the 33 mandates to cen/cenelec concerning the execution of standardisation work intended to be used for the evaluation of construction products in respect of their reaction to fire (M 88 – EN). URL : <https://law.resource.org/pub/eu/mandates/m088.pdf> (дата звернення : 03.10.2023).
43. Amendment to horizontal complement to the mandates to cen/cenelec concerning the execution of standardisation work for the evaluation of construction products in respect of their reaction to fire (M 12. URL : <https://law.resource.org/pub/eu/mandates/m123.pdf> (дата звернення : 03.10.2023).
44. 98/457/EC: Commission Decision of 3 July 1998 concerning the test of the Single Burning Item (SBI) referred to in Decision 94/611/EC implementing Article 20 of Council Directive 89/106/EEC on construction products (notified under document number C(1998) 1743) (Text with EEA relevance) – OJ L 201, 17.7.1998, p. 114–116. URL : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX%3A31994D0611> (дата звернення : 03.10.2023).
45. CEN/TS 15447:2006 Mounting and fixing in reaction to fire tests under the Construction Products Directive. URL : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX%3A31994D0611> (дата звернення : 03.10.2023).
46. EN 16000:2010 Plastics piping systems – Systems within the building structure – Mounting and fixing of components in the test apparatus to thermal attack by a single burning item. [Document published on : 2010-04-26] Brussels : CEN, 2010. 10 p.
47. EN 16724:2015 Thermal insulation products for building applications – Instructions for mounting and fixing for determination of the reaction to fire testing of external thermal Insulation composite systems (ETICS). [Document published on : 2015-12-09]. Brussels : CEN, 2015. 16 p.
48. Amendment to horizontal complement to the mandates to cen/cenelec concerning the execution of standardisation work for the evaluation of construction products in respect of their reaction to fire (M/133 EN). URL : <https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52015SC0301&rid=5> (дата звернення : 03.10.2023).
49. ISO 9705-1:2016 Reaction to fire tests — Room corner test for wall and ceiling lining products. Part 1 : Test method for a small room configuration configuration. [Document published on: 2016-02-01]. Geneva : ISO, Edition : 1, 2016. 42 p.
50. EN 14390:2007 Fire test – Large-scale room reference test for surface products. [Document published on : 2007-02-28]. Brussels: CEN, 2007. 46 p.
51. Björn Sundström, Patric van Hees, Per Thureson. Results and analysis from fire tests of building products in ISO 9705, the Room/Corner Test / The SBI Research programme. SP Swedish National Testing and Research Institute. SP Report, 1998. 74 p.
52. Björn Sundström, Jecper Axelsson. Development of a common European system for fire testing of pipe isolation based on EN 13823 (SBI) and ISO 9705 (Room/Corner Test) / SP Swedish National Testing and Research Institute. SP Report, 2002. 101 p.
53. EN 50399:2011 Common test methods for cables under fire conditions – Heat release and smoke production measurement on cables during flame spread test. Test apparatus, procedures, results. [Document published on: 2011-04-15]. Brussels : CEN, 2011. 56 p.
54. Sundström Björn, Axelsson Jesper, Patric van Hees. A proposal for fire testing and classification of cables for use in Europe / SP Swedish National Testing and Research Institute. SP Report, 2003. 38 p.
55. Robinson J. E.. The Euroclassification of cables / Communication Cables and Related Technologies EC'99, IOS Press, 1999, pp. 39–48.
56. IEC/TR 62222:2021 Fire performance of communication cables installed in buildings. [Document published on: 2021-01-16]. Geneva : ISO, Edition : 3.0, 2021. 45 p.
57. ДСТУ EN IEC 60332-3-22:2019 (EN IEC 60332-3-22:2018, IDT; IEC 60332-3-22:2018, IDT) Вогневі випробування електричних та волоконно-оптичних кабелів. Частина 3-22. Випробування вертикально розташованих проводів або кабелів, прокладених у пучках, на вертикальне поширювання полум'я. Категорія А. [Чинний від 2020-01-01]. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2020. 13 с.
58. ДСТУ EN IEC 60332-3-23:2019 (EN IEC 60332-3-23:2018, IDT; IEC 60332-3-23:2018, IDT) Вогневі випробування електричних та волоконно-оптичних кабелів. Ч. 3–23. Випробування вертикально розташованих проводів або кабелів, прокладених у пучках, на вертикальне поширювання полум'я. Категорія В. [Чинний від 2020-01-01]. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2020. 12 с.
59. ДСТУ EN IEC 60332-3-24:2019 (EN IEC 60332-3-24:2018, IDT; IEC 60332-3-24:2018, IDT) Вогневі випробування електричних та волоконно-оптичних кабелів. Ч. 3–24. Випробування вертикально розташованих проводів або кабелів, прокладених у пучках, на вертикальне поширювання полум'я. Категорія С. [Чинний від 2020-01-01]. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2020. 22 с.
60. EN 50289-4-11:2002 Communication cables. Specifications for test methods. Part 4–11 : Environmental test methods. A horizontal integrated fire test method [Document published on : 2002-03-20]. Brussels : CEN, 2002. 32 p.
61. EN 50289-4-12:2004 Communication cables. Specifications for test methods. Part 4–12 : Environmental test methods – Vertical flame spread test on bunched small communication cables
62. Document published on : 2004-02-11. Brussels : CEN, 2004. 7 p.
63. ISO 13784-1:2014 Reaction to fire test for sandwich panel building systems. Part 1 : Small room test [Document published on : 2014-02-01]. Geneva : ISO, Edition : 2, 2014. 32 p.
64. ISO 13784-2:2020 Reaction-to-fire tests for sandwich panel building systems. Part 2 : Test method for large rooms. [Document published on : 2020-10-01]. Geneva : ISO, Edition : 2, 2020. 16 p.
65. Robinson J. E. The Euroclassification of cables / Communication Cables and Related Technologies EC'99, IOS Press, 1999. pp. 39–48.
66. Test methods for smoke toxicity classification of fire-exposed construction products / Technical document. Fire Safe Europe. 33 p.
67. ISO 16405:2015 Room corner and open calorimeter. Guidance on sampling and measurement of effluent gas production using FTIR technique. [Document published on : 2015-03-31]. Geneva : ISO, Edition : 2, 2015. 24 p.

68. ISO/TS 19700:2016 Controlled equivalence ratio method for the determination of hazardous components of fire effluents. Steady-state tube furnace. [Document published on: 2016-09-01]. Geneva : ISO, Edition : 2, 201. 48 p.
69. ДСТУ EN 60332-1-3:2016 (EN 60332-1-3:2004, EN 60332-1-3:2004/A1:2015, IDT) Вогневі випробування електричних та волоконно-оптичних кабелів. Ч. 1–3. Випробування на вертикальне поширювання полум'я одиничного ізолизованого проводу чи кабелю Метод визначення крапель/часток із запалювальною здатністю. [Чинний від 2017-10-01]. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2017. 11 с.
70. Kravchenko R., Illiuchenko P., Onyshchuk A. & Zazymko O. Improvement of test methods and criteria for evaluation of resistance to flame propagation of long elements of the wiring system. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. № 6 (10 (114)). P. 57. URL : <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.249105> (дата звернення : 03.10.2023).
71. ДСТУ EN IEC 60332-3-21:2019 (EN IEC 60332-3-21:2018, IDT; IEC 60332-3-21:2018, IDT) Вогневі випробування електричних та волоконно-оптичних кабелів. Ч. 3–21. Випробування вертикально розташованих проводів або кабелів, прокладених у пучках, на вертикальне поширювання полум'я. Категорія А F/R. [Чинний від 2020-01-01]. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2020. 13 с.
72. ДСТУ EN IEC 60332-3-25:2019 (EN IEC 60332-3-25:2018, IDT; IEC 60332-3-25:2018, IDT) Вогневі випробування електричних та волоконно-оптичних кабелів. Ч. 3–25. Випробування вертикально розташованих проводів або кабелів, прокладених у пучках, на вертикальне поширювання полум'я. Категорія D. [Чинний від 2020-01-01]. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2020. 10 с.
73. IEC 61034-2:2005+AMD1:2013+AMD2:2019 Measurement of smoke density of cables burning under defined conditions – Part 2 : Test procedure and requirements. Document published on : [2019-11-22]. Brussels : CEN, 2019 . 69 p.
74. ДСТУ EN 50525-1 :2016 (EN 50525-1:2011, IDT) Кабелі електричні. Низьконапружні силові кабелі на номінальну напругу до 450/750 В (U0/U) включно. Ч. 1. Загальні вимоги. [Чинний від 2017-01-01]. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2017. 24 с.
75. ДСТУ EN 60754-1:2015 (EN 60754-1:2014, IDT) Випробування на гази, які виділяються під час горіння матеріалів кабелів. Ч. 1. Визначення виходу галоген оводнів. [Чинний від 2017-01-01]. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2017. 18 с.
76. ДСТУ IEC 60684-2:2014 Трубки електроізоляційні гнучкі. Ч. 2. Методи випробування (IEC 60684-2:2003, IDT). [Чинний від 2015-07-01]. Вид.офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2015. 18 с.
77. ДСТУ IEC 60754-3:2019 (IEC 60754-3:2018, IDT) Випробування на гази, які виділяються під час згоряння матеріалів кабелів. Ч. 3. Вимірювання виходу галогенів методом іонної хроматографії. [Чинний від 2020-01-01]. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2020.
78. Horizontal complement to the mandates to cen/cenelec concerning the execution of standardisation work for the evaluation of construction products and elements in respect of their resistance to fire (M 117). URL : https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/mandates/index.cfm?fuseaction=select_attachments.download&doc_id=1175 (дата звернення : 03.10.2023).
79. Amendment to horizontal complement to the mandates to cen/cenelec concerning the execution of standardisation work for the evaluation of construction products in respect of their resistance to fire (M 134 EN). URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52015SC0301&rid=5> (дата звернення : 03.10.2023).
80. Amendments to: horizontal complement to the mandates to cen/cenelec concerning the execution of standardisation work for the evaluation of construction products and elements in respect of their resistance to fire (M/447 EN). URL : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52015SC0301&rid=5> (дата звернення : 03.10.2023).
81. Consolidated text : Commission Decision of 3 May 2000 implementing Council Directive 89/106/EEC as regards the classification of the resistance to fire performance of construction products, construction works and parts thereof (2000/367/EC). URL : <http://data.europa.eu/eli/dec/2000/367/2011-04-12> (дата звернення : 03.10.2023).
82. EN 1992-1-2:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1–2 : General rules. Structural fire design. [Document published on : 2004-12-01]. Brussels : CEN, 2004. 99 p.
83. EN 1993-1-2:2005 Eurocode 3 : Design of steel structures. Part 1–2 : General rules - Structural fire design. [Document published on : 2005-04-20]. Brussels : CEN, 2005. 78 p.
84. EN 1994-1-2:2005 Eurocode 4 : Design of composite steel and concrete structures. Part 1–2 : General rules. Structural fire design. [Document published on : 2005-08-31]. Brussels : CEN, 2005. 109 p.
85. EN 1995-1-2:2004 Eurocode 5: Design of timber structures. Part 1–2 : General - Structural fire design. [Document published on : 2004-11-24]. Brussels : CEN, 2004. 69 p.
86. EN 1996-1-2 : 2005 Eurocode 6 : Design of masonry structures. Part 1–2 : General rules. Structural fire design. [Document published on : 2005-05-01]. Brussels : CEN, 2005 85 p.
87. EN 1999-1-2: 2007 Eurocode 9 : Design of aluminium structures. Part 1–2 : Structural fire design. [Document published on : 2007-11-14]. Brussels : CEN, 2007. 61 p.
88. Commission Recommendation of 11 December 2003 on the implementation and use of Eurocodes for construction works and structural construction products (Text with EEA relevance) (notified under document number C(2003) 4639). OJ L 332, 19.12.2003. P. 62–63
89. Official Journal of the European Communities // Communication of the Commission with regard to the interpretative documents of Council Directive 89/106/EEC. Interpretative document essential requirement № 2 «Safety in case of fire». 94/C62/01. P. 23–73.
90. ДСТУ Б В.1.1-18:2007 Споруди та фрагменти будівель. Метод натурних вогневих випробувань. Загальні вимоги. [Чинний від 2008-04-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2008. 10 с.
91. ДБН В.1.2-7:2008 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Основні вимоги до будівель і споруд. Пожежна безпека. [Чинний від 2008-10-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2008. 31 с.
92. ДСТУ EN 13501-2:2016 (EN 13501-2:2007 + A1:2009, IDT) Пожежна класифікація будівельних виробів і будівельних конструкцій. Ч. 2. Класифікація за результатами випробувань на вогнестійкість, крім складників вентиляційних систем. [Чинний від 2016-09-01]. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2016. 80 с.
93. ДСТУ EN 13501-3:2016 (EN 13501-3:2005 + A1:2009, IDT) Пожежна класифікація будівельних виробів і будівельних конструкцій. Частина 3. Класифікація за результатами випробувань на вогнестійкість виробів та конструкцій, які використовують в інженерних системах будівель. Вогнестійкі повітроводи та протипожежні клапани. [Чинний від 2016-09-01]. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2016. 21 с.
94. EN 13501-2:2016 Fire classification of construction products and building elements. Part 2 : Classification using data from fire resistance tests, excluding ventilation services. [Document published on: 2016-07-31]. Brussels : CEN, 2016. 84 p.

95. EN 13501-3:2005 + A1:2009 Fire classification of construction products and building elements. Part 3 : Classification using data from fire resistance tests on products and elements used in building service installations: fire resisting ducts and fire dampers [Document published on: 2009-11-30]. Brussels : CEN, 2009. 24 p.
96. EN 13501-4:2016 Fire classification of construction products and building elements. Part 4 : Classification using data from fire resistance tests on components of smoke control systems [Document published on : 2016-07-31]. Brussels : CEN, 2016. 34 p.
97. BS EN 13830:2015+A1:2020 Curtain walling – Product standard. [Document published on : 2022-10-31]. Brussels : CEN, 2022. 96 p.
98. prEN 1364-4 Fire resistance tests for non-loadbearing elements. Part 4 : Curtain walling. Part configuration. [Document published on : 2014-02-05]. Brussels : CEN, 2014. 60 p.
99. Звіт про науково-дослідну роботу Обґрунтування процедури розширеного застосування результатів випробувань покрівель та покрівельних матеріалів зовнішнім вогневим впливом («Випробування покрівель – розширене застосування»). № 0119U100719. 2020, ІДУ НД ЦЗ. 114 с.
100. CEN/TS 1187:2012 Test methods for external fire exposure to roofs. [Document published on : 2012-04-30]. Brussels : 2012. 60 p.
101. Amendment to: horizontal complement m/88 to the mandates to cen/cenelec concerning the execution of standardisation work for the evaluation of construction products in respect of their reaction to fire (M/385 EN). URL : https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-9-2023-0207_EN.html (дата звернення : 03.10.2023).
102. EN 13501-6:2018 Fire classification of construction products and building elements – Part 6 : Classification using data from reaction to fire tests on power, control and communication cables. [Document published on: 2019-01-14]. Brussels : CEN, 2019. 34 p.
103. EN 13501-5:2016 Fire classification of construction products and building elements – Part 5 : Classification using data from external fire exposure to roofs tests. [Document published on : 2016-09-30]. Brussels : CEN, 2016. 30 p.
104. CEN/TS 1187:2012 Test methods for external fire exposure to roofs [Document published on : 2012-04-30]. Brussels : 2012. 60 p.
105. ДСТУ CEN/TS 1187:2016 (CEN/TS 1187:2012, IDT) Методи випробувань покрівель зовнішнім вогневим впливом. [Чинний від 2016-09-01]. Київ : УкрНДНЦ, 2016. 61 с.

REFERENCES

1. Law of Ukraine On the provision of construction products on the market from September 2 2020, № 850-IX. (2020, October 3). *Holos Ukrainy*, № 183. [in Ukrainian].
2. Regulation (EU) No. 305/2011 of the European Parliament and of the Council of 9 March 2011 laying down harmonized conditions for the marketing of construction products and repealing Council Directive 89/106/EEC. (2011, April 4). OJ L 88. p. 5–43. Retrived from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32011R0305> [in English].
3. Resolution of the Cabinet of the Ministers of Ukraine On approval of the list of categories of construction products from April 28 2021. № 426. (2021, April 30). *Uriadovyi kurer*. № 84. [in Ukrainian].
4. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine Some issues of providing construction products on the market from December 23 2021, № 1458. (2022, February 1). *Uriadovyi kurer*, № 19. [in Ukrainian].
5. DSTU EN 13501-1:2016. Pozhezhna klasyfikatsiia budivelnnykh vyrobiv i budivelnnykh konstruktiv. Chastyna 1. Klasyfikatsiia za rezultaty vyprobuvann shchodo reaktsii na vohon. [Fire classification of construction products and construction structures. Part 1. Classification according to the results of tests for reaction to fire.] (EN 13501-1:2007+A1:2009, IDT). From 1st September 2016. (2016) Kyiv: UkrNDNTs. [in Ukrainian].
6. EN 13501-1:2018 Fire classification of construction products and building elements – Part 1: Classification using data from reaction to fire tests [Document published on: 2019-01-14]. Brussels: CEN, 2019. 58 p. [in English]
7. DBN V.1.1-7:2016 Pozhezhna bezpeka ob'ektiv budivnytstva. Zahalni vymohy Pozhezhna bezpeka ob'ektiv budivnytstva. Zahalni vymohy. [Fire safety of construction sites. General requirements Fire safety of construction objects. general requirements]. From 1st June 2017. (2016) Kyiv: Minrehion Ukrainy. [in Ukrainian].
8. DSTU 4809:2007 Izolovani provody ta kabeli. Vymohy pozhezhnoi bezpeky ta metody vyprobuvannia. [Insulated wires and cables. Fire safety requirements and test methods] From 1st January 2008. (2008) Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy. [in Ukrainian].
9. Nizhnyk, O. O Sizikov, R. V. Ukhanskyi, D. V. Martiuk, O. M Tyshchenko. (2012). Analitichni doslidzhennia vymoh yevropeyskykh (mizhnarodnykh) normatyvnykh dokumentiv shchodo pozhezhnoi klasyfikatsii budivelnnykh materialiv. [Analytical studies of the requirements of European (international) regulatory documents regarding the fire classification of building materials.] *Scientific Bulletin UkrNDIPB*, 44–49 [in Ukrainian].
10. Kovalenko V. V. Kharchenko I. O., Kravchenko R. I., Spiridonchev M. O. (2005) Vyznachennia pozhezhnoi nebezpeky izolovanykh provodiv i kabeliv [Determination of the fire hazard of insulated wires and cables.] *Scientific Bulletin of UkrNDIPB*, 2(12), 28–34 [in Ukrainian].
11. DSTU EN ISO 1716:2019 (EN ISO 1716:2018, IDT; ISO 1716:2018, IDT) Vyprobuvannia vyrobiv shchodo reaktsii na vohon. Vyznachennia velychyny teploty zghoriannia (teplotvorna zdattist) tyskiv. [Testing products for reaction to fire. Determination of the heat of combustion (calorific value) of pressures.] From 19 January 2019. (2019) Kyiv: UkrNDNTs. [in Ukrainian].
12. DSTU EN ISO 1182:2016 (EN ISO 1182:2010, IDT) Vyprobuvannia vyrobiv shchodo reaktsii na vohon. Vyprobuvannia na nehorichnist. [Testing products for reaction to fire. Non-flammability test.] From 1st September 2019. (2019) Kyiv: UkrNDNTs. [in Ukrainian].
13. ISO 9239-1:2010 Reaction to fire tests for floorings — Part 1: Determination of the burning behavior using a radiant heat source. [Document published on: 2010-06-01]. Geneva: ISO, Edition: 3, 2010. 25 p. [in English].
14. EN 13823:2020 Reaction to fire tests for building products – Building products excluding floorings exposed to the thermal attack by a single burning item. [Document published on: 2020-05-31]. Brussels: CEN, 2020. 108 p. [in English].
15. ISO 11925-2:2020 Reaction to fire tests — Ignitability of products subjected to direct impingement of flame – Part 2: Single-flame source test. [Document published on: 2020-02-15] Geneva: ISO, Edition: 4, 2020. 27 p. [in English].
16. ISO 13943:2017 Fire safety – Vocabulary. [Document published on: 2017-07-03] Geneva: ISO, Edition: 3, 2017. 53 p. [in English].
17. IEC 60695-1-20:2016 Fire hazard testing. Part 1–20: Guidance for assessing the fire hazard of electrotechnical products – Ignitability – General guidance. [Document published on: 2016-01-27]. Geneva: IEC, Edition: 1, 2016. 46 p. [in English].

18. IEC 60695-9-1:2016 Fire Hazard Testing. Part 9-1: Surface Spread Of Flame – General Guidance. [Document published on: 2013-04-01]. Geneva: IEC, Edition: 3, 2013. 11 p. [in English].
19. IEC 60695-8-1:2017 Fire hazard testing Heat release. General guidance. [Document published on: 2017-02-28]. Geneva: IEC, Edition: 3, 2017. 32 p. [in English].
20. IEC 60695-6-1:2021 Fire hazard testing. Part 6-1: Smoke obscuration - General guidance. [Document published on: 2021-08-05]. Geneva: IEC, Edition: 3, 2021. 65 p. [in English].
21. IEC 60695-7-1:2010 Fire hazard testing – Part 7-1: Toxicity of fire effluent – General guidance. [Document published on: 2010-06-28]. Geneva: IEC, Edition: 3, 2010. 50 p. [in English].
22. IEC 60695-5-1:2021 Fire hazard testing – Part 5-1: Corrosion damage effects of fire effluent – General guidance. [Document published on: 2021-10-28]. Geneva: IEC, Edition: 3, 2010. 38 p. [in English].
23. DSTU 8829:2019 Pozhezhovybukhonebezpechnist rehovyn i materialiv. Nomenklatura pokaznykiv i metody yikhnoho vyznachennia. Klasyfikatsiia. [Fire and explosion hazard of substances and materials. Nomenclature of indicators and methods of their determination. Classification.] From 1st January 2020. (2020) Kyiv: UkrNDNTs. [in Ukrainian].
24. DSTU B V.1.1-2-97 (GOST 30402-96) Materialy budivelni. Metod vyprovuvannia na zaimystist. [Construction materials. Flammability test method.] from 1st January 1998. (1998) Kyiv: Minrehion Ukrainy [in Ukrainian].
25. DSTU B V.2.7-70-98 (GOST 30444-97) Materialy budivelni. Metod vyprovuvannia na rozpovsiudzhennia polumia [Building materials. Flame propagation test method.] from 1st January 1999. (1999) Kyiv: Minrehion Ukrainy. [in Ukrainian].
26. ISO 5657:1997 Reaction to fire tests – Ignitability of building products using a radiant heat source. [Document published on: 197-12-15]. Geneva: ISO, Edition: 2, 1997. 46 p. [in English].
27. DSTU B V.1.1-21:2009 Zakhyst vid pozhezh. Konstruktsii zovnishnikh stin z fasadnoi teploizolatsiieiu. Metod velykomasshtabnykh vohnevnykh vyprovuvan. [Fire protection. Designs of external walls with facade thermal insulation. Method of large-scale fire tests] (ISO 13785-2:2002, MOD). From 1st August 2009. (2009) Kyiv: Minrehion Ukrainy. [in Ukrainian].
28. DSTU B V.1.1-22:2009 Zakhyst vid pozhezh. Konstruktsii zovnishnikh stin z fasadnoi teploizolatsiieiu. Metod serednomasshtabnykh vohnevnykh vyprovuvan [Fire protection. Designs of external walls with facade thermal insulation. Medium-scale fire test method] (ISO 13785-1:2002, MOD). From 1st August 2009. (2009) Kyiv: Minrehion Ukrainy of Ukraine. [in Ukrainian].
29. DSTU 9072:2021 Konstruktsii zovnishnikh stin iz fasadnoi teploizolatsiieiu. Metod naturnykh vohnevnykh vyprovuvan zbirnykh system fasadnoi teploizolatsii z oporiadzhenniam shtukaturkamy ta drobnoштучnymy elementamy na poshyrennia vohniu. [Structures of external walls with facade thermal insulation. The method of full-scale fire tests of prefabricated facade thermal insulation systems equipped with plasters and small artificial elements for the spread of fire.] From 1st August 2021. Kyiv: UkrNDNTs. [in Ukrainian].
30. ISO 13785-1:2002 Reaction-to-fire tests for facades – Part 1: Intermediate-scale test. [Document published on: 2002-12-01]. Geneva: ISO, Edition: 1, 2002. 10 p. [in English].
31. ISO 13785-2:2002 Reaction-to-fire tests for facades – Part 2: Large-scale test. [Document published on: 2002-12-01]. Geneva: ISO, Edition: 1, 2002. 16 p. [in English].
32. Addendum to mandate to cen/cenelec concerning the execution of standardization work for harmonized standards on m 103 «Thermal Insulation Products». M/367 EN) Retrived from <https://law.resource.org/pub/eu/mandates/m367.pdf> [in English].
33. Amendment to: horizontal complement m/88 to the mandates to cen/cenelec concerning the execution of standardization work for the evaluation of construction products in respect of their reaction to fire (M/385 EN). Retrived from <https://law.resource.org/pub/eu/mandates/m385.pdf> [in English].
34. EN 16733:2016 Reaction to fire tests for building products – Determination of a building product's propensity to undergo continuous smouldering. [Document published on: 2016-05-04] Brussels: CEN, Edition: 2, 2016. 21 p. [in English].
35. EN 1794-3:2016 Road traffic noise reducing devices – Non-acoustic performance – Part 3: Reaction to fire – Burning behavior of noise reducing devices and classification. [Document published on: 2016-12-01]. Brussels: CEN, Edition: 1, 2016. 15 p. [in English].
36. ISO 5659-2:2017 Plastics – Smoke generation – Part 2: Determination of optical density by a single-chamber test. [Document published on: 2017-05-01]. Geneva: ISO, Edition: 4, 2017. 49 p. [in English].
37. EN 17084:2018 Railway applications – Fire protection on railway vehicles – Toxicity test of materials and components. [Document published on: 2018-12-19]. Brussels: CEN, Edition: 1, 2018. 44 p. [in English].
38. ISO 1182:2020 Reaction to fire tests for products – Non-combustibility test. [Document published on: 2020-06-01]. Geneva: ISO, Edition: 6, 2020. 40 p. [in English].
39. ISO 1716:2018 Reaction to fire tests for products – Determination of the gross heat of combustion (calorific value). [Document published on: 2018-05-20]. Geneva: ISO, Edition: 4, 2018. 38 p. [in English].
40. Commission Delegated Regulation (EU) of July 1, 2015 on the classification of the reaction to fire performance of construction products pursuant to Regulation (EU). No. 305/2011 of the European Parliament and of the Council. – OJ L 68, (2016, March 15). p. 4–11. Retrived from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32016R0364> [in English].
41. IEC 60332-1-2:2004+AMD1:2015 Tests on electric and optical fiber cables under fire conditions – Part 1-2: Test for vertical flame propagation for a single insulated wire or cable – Procedure for 1 kW pre-mixed flame. [Document published on: 2015-07-28] Brussels: CEN, 2015. 48 p. [in English].
42. Horizontal complement to the 33 mandates to cen/cenelec concerning the execution of standardization work intended to be used for the evaluation of construction products in respect of their reaction to fire (M 88 – EN). Retrived from <https://law.resource.org/pub/eu/mandates/m088.pdf> [in English].
43. Amendment to horizontal complement to the mandates to cen/cenelec concerning the execution of standardization work for the evaluation of construction products in respect of their reaction to fire (M 123) Retrived from <https://law.resource.org/pub/eu/mandates/m123.pdf> [in English].
44. 98/457/EC: Commission Decision of 3 July 1998 concerning the test of the Single Burning Item (SBI) referred to in Decision 94/611/EC implementing Article 20 of Council Directive 89/106/EEC on construction products (notified under document number C(1998) 1743) (Text with EEA relevance) – OJ L 201, (1998 July 17). p. 114–116 Retrived from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX%3A31994D0611> [in English].
45. CEN/TS 15447:2006 Mounting and fixing in reaction to fire tests under the Construction Products Directive Retrived from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX%3A31994D0611> [in English].
46. EN 16000:2010 Plastics piping systems – Systems within the building structure – Mounting and fixing of components in the test apparatus to thermal attack by a single burning item [Document published on: 2010-04-26] Brussels: CEN, 2010 – 10 p.m. [in English].

47. EN 16724:2015 Thermal insulation products for building applications – Instructions for mounting and fixing for determination of the reaction to fire testing of external thermal insulation composite systems (ETICS). [Document published on: 2015-12-09]. Brussels: CEN, 2015. 16 p. [in English].
48. Amendment to horizontal complement to the mandates to cen/cenelec concerning the execution of standardization work for the evaluation of construction products in respect of their reaction to fire (M/133 EN) Retrived from <https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52015SC0301&rid=5> [in English].
49. ISO 9705-1:2016 Reaction to fire tests — Room corner test for wall and ceiling lining products. Part 1: Test method for a small room configuration. [Document published on: 2016-02-01]. Geneva: ISO, Edition: 1, 2016. 42 p. [in English].
50. EN 14390:2007 Fire test – Large-scale room reference test for surface products—[Document published on: 2007-02-28]. Brussels: CEN, 2007. 46 p. [in English].
51. Björn Sundström, Patric van Hees, Per Thureson. Results and analysis from fire tests of building products in ISO 9705, the Room/Corner Test / The SBI Research program. – SP Swedish National Testing and Research Institute. SP Report, 1998. 74 p. [in English].
52. Björn Sundström, Jecper Axelsson. Development of a common European system for fire testing of pipe isolation based on EN 13823 (SBI) and ISO 9705 (Room/Corner Test) / SP Swedish National Testing and Research Institute. SP Report, 2002. 101 p. [in English].
53. EN 50399:2011 Common test methods for cables under fire conditions – Heat release and smoke production measurement on cables during flame spread test. Test apparatus, procedures, results. [Document published on: 2011-04-15]. Brussels: CEN, 2011. 56 p. [in English].
54. n Sundström Björ, Axelsson Jesper, Patric van Hees. A proposal for fire testing and classification of cables for use in Europe / SP Swedish National Testing and Research Institute. SP Report, 2003. 38 p. [in English].
55. Robinson J. E. The Euroclassification of cables / Communication Cables and Related Technology IEC EC'99, IOS Press, 1999, pp. 39–48 [in English].
56. IEC/TR 62222:2021 Fire performance of communication cables installed in buildings. [Document published on: 2021-01-16]. Geneva: ISO, Edition: 3.0, 2021. 45 p. [in English].
57. DSTU EN IEC 60332-3-22:2019 (EN IEC 60332-3-22:2018, IDT; IEC 60332-3-22:2018, IDT) Vohnevi vyprobuвання elektrychnykh ta volokonno-optychnykh kabeliv. Chastyna 3–22. Vyprobuвання vertykalno roztashovanykh provodiv abo kabeliv, prokladenykh u puchkakh, na vertykalne poshyryuvannya polumia. Katehoriia A. [Fire tests of electric and fiber optic cables. Part 3–22. Testing vertically arranged wires or cables laid in bundles for vertical flame propagation. Category A.] from 1st January 2020. Kyiv: UkrNDNTs. [in Ukrainian].
58. DSTU EN IEC 60332-3-23:2019 (EN IEC 60332-3-23:2018, IDT; IEC 60332-3-23:2018, IDT) Vohnevi vyprobuвання elektrychnykh ta volokonno-optychnykh kabeliv. Chastyna 3–23. Vyprobuвання vertykalno roztashovanykh provodiv abo kabeliv, prokladenykh u puchkakh, na vertykalne poshyryuvannya polumia. Katehoriia V. [Fire tests of electrical and fiber optic cables. Part 3–23. Testing vertically arranged wires or cables laid in bundles for vertical flame propagation. Category B.] from 1st January 2020. (2020) Kyiv: UkrNDNC, 2020. 12 p. [in Ukrainian].
59. DSTU EN IEC 60332-3-24:2019 (EN IEC 60332-3-24:2018, IDT; IEC 60332-3-24:2018, IDT) Fire tests of electric and fiber optic cables. Part 3–24. Testing vertically arranged wires or cables laid in bundles for vertical flame propagation. Category C. [Effective from 2020-01-01]. Official release Kyiv: UkrNDNTs. [in Ukrainian].
60. EN 50289-4-11:2002 Communication cables. Specifications for test methods. Part 4-11: Environmental test methods. A horizontal integrated fire test method [Document published on: 2002-03-20]. Brussels: CEN, 2002. 32 p. [in English].
61. EN 50289-4-12:2004 Communication cables. Specifications for test methods. Part 4–12: Environmental test methods – Vertical flame spread test on bunched small communication cables [Document published on: 2004-02-11]. Brussels: CEN, 2004. 7 p. [in English].
63. ISO 13784-1:2014 Reaction to fire test for sandwich panel building systems. Part 1: Small room test [Document published on: 2014-02-01]. Geneva: ISO, Edition: 2, 2014. 32 p. [in English].
64. ISO 13784-2:2020 Reaction-to-fire tests for sandwich panel building systems. Part 2: Test method for large rooms [Document published on: 2020-10-01]. Geneva: ISO, Edition: 2, 2020. 16 p. [in English].
65. J. E. Robinson. The Euroclassification of cables / Communication Cables and Related Technology IEC EC'99, IOS Press, 1999, pp. 39–48 [in English].
66. Test methods for smoke toxicity classification of fire-exposed construction products / Technical document. Fire Safe Europe. 33 p. [in English].
67. ISO 16405:2015 Room corner and open calorimeter. Guidance on sampling and measurement of effluent gas production using FTIR technique [Document published on: 2015-03-31]. Geneva: ISO, Edition: 2, 2015. 24 p. [in English].
68. ISO/TS 19700:2016 Controlled equivalence ratio method for the determination of hazardous components of fire effluents. Steady-state tube furnace. [Document published on: 2016-09-01]. Geneva: ISO, Edition: 2, 2016. 48 p. [in English].
69. DSTU EN 60332-1-3:2016 (EN 60332-1-3:2004, EN 60332-1-3:2004/A1:2015, IDT) Vohnevi vyprobuвання elektrychnykh ta volokonno-optychnykh kabeliv. Chastyna 1–3. Vyprobuвання na vertykalne poshyryuvannya polumia odynynchoho izolovanoho provodu chy kabeliu Metod vyznachennia krapel/chastok iz zapaliuvanoi zdatnistiu. [Fire tests of electric and fiber optic cables. Part 1-3. Single insulated wire or cable vertical flame spread test Method for determining ignitable droplets/particles.] From 1st October 2017. (2017) Kyiv: UkrNDNTs. [in Ukrainian].
70. Kravchenko, R., Illiuchenko, P., Onyshchuk, A., & Zazymko, O. (2021) Improvement of test methods and criteria for evaluation of resistance to flame propagation of long elements of the wiring system. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (10 (114)). p. 57. doi:10.15587/1729-4061.2021.249105 [in English].
71. DSTU EN IEC 60332-3-21:2019 (EN IEC 60332-3-21:2018, IDT; IEC 60332-3-21:2018, IDT) Vohnevi vyprobuвання elektrychnykh ta volokonno-optychnykh kabeliv. Chastyna 3–21. Vyprobuвання vertykalno roztashovanykh provodiv abo kabeliv, prokladenykh u puchkakh, na vertykalne poshyryuvannya polumia. Katehoriia A F/R. [Fire tests of electric and fiber optic cables. Part 3–21. Testing vertically arranged wires or cables laid in bundles for vertical flame propagation. Category A F/R.] from 1st January 2020. Kyiv: UkrNDNTs. [in Ukrainian].
72. DSTU EN IEC 60332-3-25:2019 (EN IEC 60332-3-25:2018, IDT; IEC 60332-3-25:2018, IDT) Vohnevi vyprobuвання elektrychnykh ta volokonno-optychnykh kabeliv. Chastyna 3–25. Vyprobuвання vertykalno roztashovanykh provodiv abo kabeliv, prokladenykh u puchkakh, na vertykalne poshyryuvannya polumia. Katehoriia D. [Fire tests of electric and fiber optic cables. Part 3–25. Testing vertically arranged wires or cables laid in bundles for vertical flame propagation. Category D.] from 1st January 2020. Kyiv: UkrNDNTs. [in Ukrainian].
73. IEC 61034-2:2005+AMD1:2013+AMD2:2019 Measurement of smoke density of cables burning under defined conditions Part 2: Test procedure and requirements. Document published on: [2019-11-22]. Brussels: CEN, 2019. 69 p [in English].

74. DSTU EN 50525-1:2016 (EN 50525-1:2011, IDT) Kabeli elektrychni. Nyzkonapruzhni sylovi kabeli na nominalnu napruhu do 450/750 V (U0/U) vkliuchno. Chastyna 1. Zahalni vymohy. [Electric cables. Low-voltage power cables with a nominal voltage up to and including 450/750 V (U0/U). Part 1. General requirements.] from 1st January 2017. Kyiv: UkrNDNTs. [in Ukrainian].
75. DSTU EN 60754-1:2015 (EN 60754-1:2014, IDT) Vyprobuvannia na hazy, yaki vydiliaiutsia pid chas horinnia materialiv kabeliv. Chastyna 1. Vyznachennia vykhodu haloheniv ovodniv. [Tests for gases released during the burning of cable materials. Part 1. Determination of the yield of halogens of algaes.] from 1st January 2017. Kyiv: UkrNDNTs. [in Ukrainian].
76. DSTU IEC 60684-2:2014 Trubky elektroizolatsiini hnuchki. Chastyna 2. Metody vyprobuvannia [Electrically insulating flexible tubes. Part 2. Test methods] (IEC 60684-2:2003, IDT). From 1st July 2015. Kyiv: UkrNDNTs. [in Ukrainian].
77. DSTU IEC 60754-3:2019 (IEC 60754-3:2018, IDT) Vyprobuvannia na hazy, yaki vydiliaiutsia pid chas zghoriannia materialiv kabeliv. Chastyna 3. Vymiriuвання vykhodu haloheniv metodom ionnoi khromatohrafi. [Tests for gases released during the combustion of cable materials. Part 3. Measurement of the output of halogens by the method of ion chromatography.] from 1st January 2020. Kyiv: UkrNDNTs. [in Ukrainian].
78. Horizontal complement to the mandates to cen/cenelec concerning the execution of standardization work for the evaluation of construction products and elements in respect of their resistance to fire (M 117) Retrived from https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/mandates/index.cfm?fuseaction=select_attachments.download&doc_id=1175 [in English].
79. Amendment to horizontal complement to the mandates to cen/cenelec concerning the execution of standardization work for the evaluation of construction products in respect of their resistance to fire (M 134 EN) Retrived from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52015SC0301&rid=5> [in English].
80. Amendments to: horizontal complement to the mandates to cen/cenelec concerning the execution of standardization work for the evaluation of construction products and elements in respect of their resistance to fire (M/447 EN) Retrived from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52015SC0301&rid=5> [in English].
81. Consolidated text: Commission Decision of 3 May 2000 implementing Council Directive 89/106/EEC as regards the classification of the resistance to fire performance of construction products, construction works and parts thereof (2000/367/EC) Retrived from <http://data.europa.eu/eli/dec/2000/367/2011-04-12> [in English].
82. EN 1992-1-2:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-2: General rules. Structural fire design [Document published on: 2004-12-01]. Brussels: CEN, 2004. 99 p. [in English].
83. EN 1993-1-2:2005 Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design [Document published on: 2005-04-20]. Brussels: CEN, 2005 – 78 p. [in English].
84. EN 1994-1-2:2005 Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. Part 1-2: General rules - Structural fire design. [Document published on: 2005-08-31]. Brussels: CEN, 2005. 109 p. [in English].
85. EN 1995-1-2:2004 Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-2: General - Structural fire design. [Document published on: 2004-11-24]. Brussels: CEN, 2004. 69 p. [in English].
86. EN 1996-1-2: 2005 Eurocode 6: Design of masonry structures. Part 1-2: General rules – Structural fire design [Document published on: 2005-05-01]. Brussels: CEN, 2005 85 p. [in English].
87. EN 1999-1-2: 2007 Eurocode 9: Design of aluminum structures – Part 1-2: Structural fire design [Document published on: 2007-11-14]. Brussels: CEN, 2007. 61 p. [in English].
88. Commission Recommendation of 11 December 2003 on the implementation and use of Eurocodes for construction works and structural construction products (Text with EEA relevance) (notified under document number C(2003) 4639). OJ L 332, (19 December 2003) p. 62–63 [in English].
89. Official Journal of the European Communities // Communication of the Commission with regard to the interpretative documents of Council Directive 89/106/EEC. Interpretative document essential requirement No. 2. Safety in case of fire. 94/C62/01, p. 23–73 [in English].
90. DSTU B V.1.1-18:2007 Sporudy ta frahmenty budivel. Metod naturnykh vohnevnykh vyprobuvan. Zahalni vymoh [Buildings and fragments of buildings. The method of natural fire tests. General requirements.] From 1st April 2008. (2008) Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy. [in Ukrainian].
91. DBN V.1.2-7:2008 Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnnykh ob'ektiv. Osnovni vymohy do budivel i sporud. Pozhezhna bezpeka. [System of ensuring reliability and safety of construction objects. Basic requirements for buildings and structures. Fire Security.] From 1st October 2008. (2008) Kyiv: Minrehionbud Ukrainy. [in Ukrainian].
92. DSTU EN 13501-2:2016 (EN 13501-2:2007 + A1:2009, IDT) Pozhezhna klasyfikatsiia budivelnnykh vyrobiv i budivelnnykh konstruksii. Chastyna 2. Klasyfikatsiia za rezultatamy vyprobuvan na vohnestiikist, krim skladnykh ventyliatsiinykh system. [Fire classification of building products and building structures. Part 2. Classification according to the results of fire resistance tests, except for components of ventilation systems.] From 1st September 2016. (2016) Kyiv: UkrNDNTs. [in Ukrainian].
93. DSTU EN 13501-3:2016 (EN 13501-3:2005 + A1:2009, IDT) Pozhezhna klasyfikatsiia budivelnnykh vyrobiv i budivelnnykh konstruksii. Chastyna 3. Klasyfikatsiia za rezultatamy vyprobuvan na vohnestiikist vyrobiv ta konstruksii, yaki vykorystovuiut v inzhenernykh systemakh budivel. Vohnestiiki povitrovody ta protypozhezhni klapany. [Fire classification of building products and building structures. Part 3. Classification according to the results of fire resistance tests of products and structures used in engineering systems of buildings. Fire-resistant ducts and fire valves.] From 1st September 2016. (2016) Kyiv: UkrNDNTs. [in Ukrainian].
94. EN 13501-2:2016 Fire classification of construction products and building elements. Part 2: Classification using data from fire resistance tests, excluding ventilation services [Document published on: 2016-07-31]. Brussels: CEN, 2016. 84 p. [in English].
95. EN 13501-3:2005 + A1:2009 Fire classification of construction products and building elements. Part 3: Classification using data from fire resistance tests on products and elements used in building service installations: fire resisting ducts and fire dampers. [Document published on: 2009-11-30]. Brussels: CEN, 2009. 24 p. [in English].
96. EN 13501-4:2016 Fire classification of construction products and building elements. Part 4: Classification using data from fire resistance tests on components of smoke control systems [Document published on: 2016-07-31]. Brussels: CEN, 2016. 34 p. [in English].
97. BS EN 13830:2015+A1:2020 Curtain walling – Product standard. [Document published on: 2022-10-31]. Brussels: CEN, 2022. 96 p. [in English].
98. prEN 1364-4 Fire resistance tests for non-loadbearing elements. Part 4: Curtain walling – Part configuration. [Document published on: 2014-02-05]. Brussels: CEN, 2014 – 60 p. [in English].
99. Report on the research work Justification of the procedure for the extended application of the results of tests of roofs and roofing materials under external fire influence («Roof testing - extended application») no. 0119u100719, 2020, idu nd čz , 114 c [in english].
100. CEN/TS 1187:2012 Test methods for external fire exposure to roofs [Document published on: 2012-04-30]. Brussels: 2012. 60 p. [in English].

101. Amendment to: horizontal complement m/88 to the mandates to cen/cenelec concerning the execution of standardization work for the evaluation of construction products in respect of their reaction to fire (M/385 EN) Retrived from https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-9-2023-0207_EN.html [in English].
102. EN 13501-6:2018 Fire classification of construction products and building elements – Part 6: Classification using data from reaction to fire tests on power, control and communication cables. [Document published on: 2019-01-14]. Brussels: CEN, 2019. 34 p. [in English].
103. EN 13501-5:2016 Fire classification of construction products and building elements – Part 5: Classification using data from external fire exposure to roofs tests. [Document published on: 2016-09-30]. Brussels: CEN, 2016 30 p. [in English].
104. CEN/TS 1187:2012 Test methods for external fire exposure to roofs [Document published on: 2012-04-30]. Brussels: 2012. 60 p. [in English].
105. DSTU CEN/TS 1187:2016 (CEN/TS 1187:2012, IDT) Metody vyprobuvan pokriviel zovnishnim vohnevym vplyvom. [Methods of testing roofs by external fire.] From 1st September 2016. (2016) Kyiv: UkrNDNT. [in Ukrainian].

COMPARATIVE ANALYSIS OF DOMESTIC AND EUROPEAN FIRE CLASSIFICATIONS OF BUILDING PRODUCTS

D. Khromenkov, R. Kravchenko, N. Ilchenko, O. Korolova, Yu. Gulyk

Institute of Public Administration and Research in Civil Protection, Ukraine

KEYWORDS: ANNOTATION

fire classification,
building
products,
building
structure,
essential fire
characteristics,
reaction to fire.

The relevance of the work is related to solving the problem of eliminating the discrepancy between the European and domestic fire classification of construction products. The problem of the introduction of the European fire classification of construction products in Ukraine is the lack of data on the compliance of such products, manufactured by domestic manufacturers, with the requirements of European standards, the lack of appropriate test equipment in the laboratories of Ukraine, and significant differences between the domestic and European fire classifications of building materials, products and structures. Based on the results of analytical studies and a comparative analysis of European and national experience regarding the features of the use of fire classification of construction products, during which the categories, groups and types of construction products and their essential fire characteristics of the means of fire protection of buildings were determined, in particular, the properties of the essential fire characteristics of construction products were substantiated, classes regarding reaction to fire of construction products, criteria for indicators of fire resistance of construction products. The conducted analysis of the implementation of the fire classification of construction products gives a clearer picture of the problems of the implementation of the European fire classification, namely the main issue regarding the adoption of the concept of further adaptation and implementation of the European fire classification in national regulatory documents. On the basis of the above, it is relevant to establish the relationship between classes, indicators and criteria for assessing the fire hazard of construction products established in Ukrainian and European regulatory documents.

УДК 614.841.45

ВИЗНАЧЕННЯ АДЕКВАТНОСТІ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛОМАСООБМІНУ ПІД ЧАС ВИНИКНЕННЯ ПОЖЕЖ У ВЕРТИКАЛЬНИХ КАБЕЛЬНИХ ТУНЕЛЯХ АТОМНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2.153-161>

Трошкін С. Е.^{1*}, ORCID iD 0000-0002-3795-2000

Поздєєв С. В.¹, ORCID iD 0000-0003-3370-9027

Некора О. В.¹, ORCID iD 0000-0002-5202-3285

Беліков А. С.², ORCID iD 0000-0001-5822-9682

*E-mail: sergeytroshkin455@gmail.com

¹Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, Україна

²Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 30.09.2023

Пройшла рецензування:
15.10.2023

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

атомна електрична станція,
контаймент, вертикальний
кабельний тунель,
математичне моделювання,
натурний експеримент, критерій
адекватності, температурний
режим пожежі.

АНОТАЦІЯ

Метою проведення досліджень є визначення особливостей процесів тепломасоперенесення під час реальної пожежі у вертикальних кабельних тунелях атомних електростанцій. Вивчення адекватності побудованих математичних моделей дасть змогу встановити ефективність моделювання теплових процесів для їх використання під час дослідження вогнестійкості огорожувальних конструкцій вертикальних кабельних тунелів атомних електростанцій. Для досягнення зазначеного на тренувально-спортивному комплексі 1-го Державного пожежно-рятувального загону Головного Управління ДСНС України у Запорізькій області з охорони об'єктів проведено натурні випробування і отримано дані про динаміку зміни температури у вертикальному кабельному тунелі з відомими геометричними параметрами та пожежним навантаженням. У програмному забезпеченні Fire Dynamics Simulator створена математична модель вертикального кабельного тунелю, яка аналогічна до натурної. Здійснено обчислювальний експеримент. Моделювання як метод наукового дослідження дає можливість проводити всі необхідні дослідження щодо визначення температурних режимів пожежі у вертикальних кабельних тунелях, не виконуючи матеріально витратних та трудомістких натурних експериментів на моделях. З огляду на результати обчислювального експерименту і натурних випробувань розраховано критерії адекватності. Для перевірки побудованої математичної моделі використовуються критерії Фішера, Стюдента та Кохрена. На основі проведеної наукової розвідки досліджено адекватність використовуваних математичних моделей. Аналізуючи порівняння дисперсії результатів математичного моделювання процесу тепломасообміну під час пожежі, можна констатувати, що жодне зі значень критеріїв адекватності не перевищило допустимих, а відносне відхилення склало 7,85%, що вказує на ефективність моделювання теплових процесів для проведення подальших досліджень температурних режимів пожежі у вертикальних кабельних тунелях атомних електричних станцій. У цій роботі дістало подальшого розвитку питання застосування обчислювальних експериментів для дослідження процесів тепломасообміну під час пожеж у вертикальних кабельних тунелях атомних електричних станцій.

Постановка проблеми. На енергетичних об'єктах пожежам у кабельному господарстві відводиться

особливе місце. Зазвичай вони призводять до зупинки або окремих вузлів і агрегатів, або всього об'єкта. Якщо пожежа зачіпає

систему управління і безпеки реакторної установки атомної електричної станції, може статися порушення герметичності контейменту і викид радіоактивних речовин в атмосферу, що може спричинити техногенну катастрофу світового масштабу. Найчастіше причиною виникнення пожеж є короткі замикання, перевантаження, ушкодження ізоляції, великі перехідні опори в контактах тощо. Розвитку пожеж у кабельних тунелях сприяє ряд факторів [1–3]: наявність великого пожежного навантаження – горючої ізоляції; прогрів електрокабелів на всій довжині внаслідок проходження струму; прогрів електрокабелів перед прокладанням по кабельним лініям; складне конструктивне виконання кабельних споруд (наявність розгалуженої мережі кабельних тунелів), поверхів, наявність вертикальних кабельних тунелів.

Особливістю пожеж у кабельних тунелях є стрімке поширення пожежі. Швидкість поширення горіння в кабельних тунелях під час прокладання кабелів по металевих кронштейнах і знятого в просторі навантаження становить 0,1–0,3 м/хв, а в кабельних напівповерхах – 0,2–0,4 м/хв. За наявності напруги на кабелях швидкість поширення горіння може досягати 1,2 м/хв. Пожежі в кабельних приміщеннях відрізняються порівняно високою швидкістю наростання об'ємної температури – 30–40 °С/хв, яка залежить від обсягу і величини пожежного навантаження. Їх розвиток у кабельних тунелях супроводжується інтенсивним виділенням високотоксичних продуктів згоряння, які швидко заповнюють весь обсяг кабельного приміщення і створюють додатковий прогрів ізоляції кабелів, що призводить до різкого збільшення лінійної швидкості поширення полум'я. Крім того, необхідно враховувати, що продукти горіння за невеликих швидкостей повітряного потоку (до 0,6 м/хв.) здатні поширюватися проти цього потоку.

Дослідження температурного режиму пожежі із проведенням реальних пожеж є актуальним питанням [4–6], оскільки вертикальні кабельні тунелі відрізняються

геометричною конфігурацією, видом кабелів, що прокладені у них, пожежним навантаженням та аеродинамічними характеристиками. Це призводить до того, що температурний режим пожежі у таких тунелях може відрізнятися від стандартного температурного режиму пожежі, визначеного відповідно до ДСТУ Б В.1.1-4. Відомим прикладом відмінності від стандартного є дослідження ТНО з отриманою температурною пожежною кривою RWS [7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Автори в роботах [8–9] перевіряли на адекватність математичні моделі теплових процесів розвитку і гасіння пожеж у будівлях, приміщеннях та тунелях, використовуючи різні спеціалізовані програмні забезпечення. Обґрунтовано та підтверджено адекватність побудованих математичних моделей із подальшим вивченням температурного режиму пожежі. В роботі [7] наведено результати досліджень, що стосувалися температурного впливу пожежі в тунелі Рунехамп у Норвегії. Зазначено, що дослідження ТНО підтвердили попередні результати, отримані в 1979 році в Нідерландах. У праці (розділ VII.3 «Вогнева реакція матеріалів» звіту 1999 р. 05.05.Б «Контроль вогню та диму в тунелях») обговорюються характеристики скельних тунельних облицювань та порівнюються із залізобетонними. Інтенсивність тепла, що виділяється під час великої пожежі, може призвести до того, що огорожувальна конструкція тунелю втратить свою несучу функцію. Але порівнявши температурно-часові залежності пожеж, з'ясувалось, що виникають об'єктивні труднощі, пов'язані з визначенням вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій кабельних тунелів атомних електричних станцій, оскільки основним методом визначення вогнестійкості будівельних конструкцій згідно зі встановленими вимогами ДСТУ Б В.1.1-4 є метод випробувань за стандартним температурним режимом пожежі.

Формулювання цілей дослідження. Метою роботи є перевірка адекватності побудованої моделі пожежі у вертикальному кабельному тунелі, створеному в програмному забезпеченні «Fire Dynamics Simulator 6.7.9» на основі проведеного натурного експерименту для їх подальшого використання під час вивчення впливу пожежного навантаження та конструктивних характеристик вертикальних кабельних тунелів атомних електричних станцій на температурний режим пожежі.

Для досягнення поставленої мети були визначені такі задачі:

1. Проаналізувати отримані експериментальні дані натурного випробування та описати математичну модель вертикального кабельного тунелю атомної електричної станції, створену у програмному комплексі «Fire Dynamics Simulator».

2. Визначити критерії адекватності математичних моделей пожеж у кабельних тунелях, створених у програмному комплексі «Fire Dynamics Simulator 6.7.9» на основі експериментальних даних (t-критерій Стюдента, Q-критерій Кохрена, F-критерій Фішера).

3. Визначити придатність математичної моделі до відтворення процесів тепломасоперенесення під час пожежі у кабельних тунелях.

Виклад основного матеріалу. На тренувально-спортивному комплексі 1-го Державного пожежно-рятувального загону Головного Управління ДСНС України у

Запорізькій області з охорони об'єктів проведено натурні вогневі випробування. Для підвищення достовірності результатів було здійснено три експерименти. Тривалість кожного з них склала 5400 с. На рис. 1 наведено вигляд кабелів у відповідній секції вертикального кабельного тунелю для формування пожежного навантаження.



Рисунок 1 – Вигляд вертикально встановлених кабелів, зафіксованих у спеціальних кабельних кронштейнах для формування наявного пожежного навантаження

Джерело матеріалу: розроблено авторами

На рис. 2 показано вигляд вертикального кабельного тунелю у процесі експериментальних досліджень. Горючим матеріалом електричного кабелю є полівінілхлорид (ПВХ), матеріал який перебуває в зоні теплового впливу – сталеві кронштейни та металеві дроти кріплення з маркою сталі якості Ст. 3сп.



Рисунок 2 – Фото кабельного тунелю під час проведення експерименту



Джерело матеріалу: розроблено авторами

Як джерело запалювання кабелів використовується модельне вогнище класу пожежі 32В у вигляді піддона. Параметри джерел запалювання: висота піддона осередку пожежі 32В – 200 мм; розміри осередку пожежі – 1000х1000 мм (площа пожежі 1,0 м²); дизельне пальне 30 л; бензин автомобільний 2 л; кількість води в піддоні – 20 л. Як горюча рідина використовується дизельне паливо марки ДП-3-Евро5-В0, бензин марки А-92-Євро5-Е0. Враховуючи конфігурацію зони розвиненої пожежі, розташовано

контрольно-вимірювальну арматуру – температурні датчики на відстані від стіни в 500 мм. Як температурні датчики застосовуються хромель-алюмелеві термопари в комплекті з контрольною інфраструктурою для ідентифікації температурних даних з температурних датчиків. Похибка вимірювання термопар складає ± 1 С. Схема розташування термопар у вертикальному кабельному тунелі наведена на рис. 3.

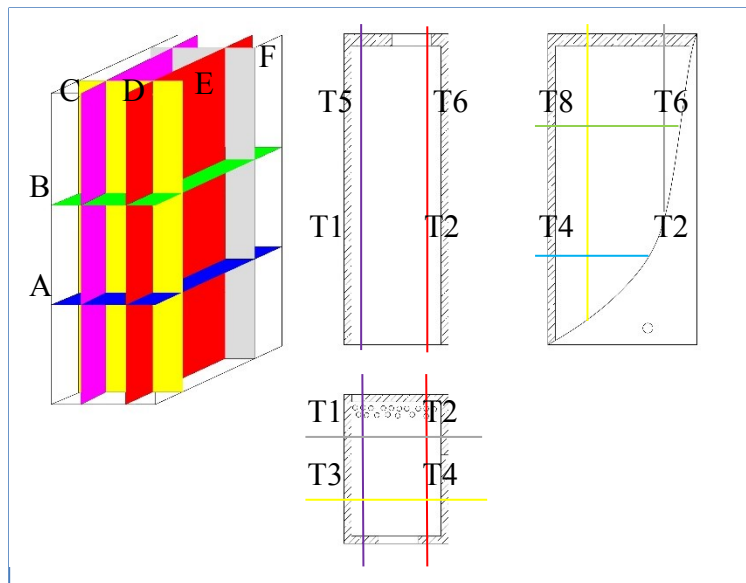
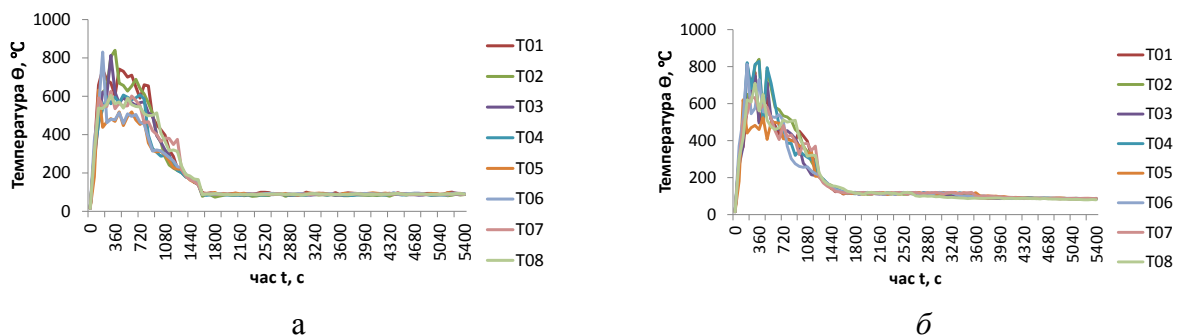
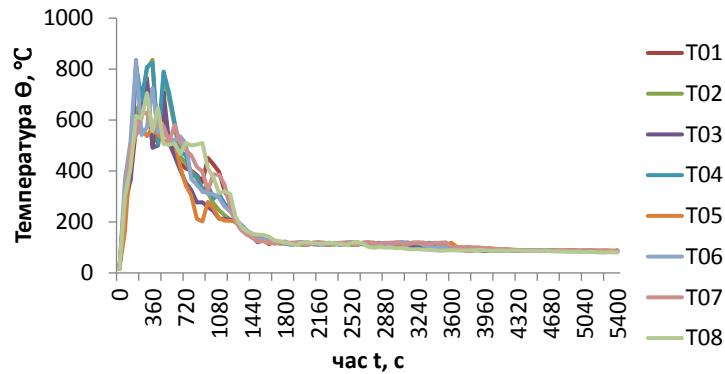


Рисунок 3 – Схема розташування термопар по вимірювальним площинам на поверхсі вертикального кабельного тунелю атомної електричної станції, відмітка 13,200 м

Джерело: розроблено авторами

Випробування здійснено за температури +16 °С та відносної вологості повітря 48%, що відповідає ДСТУ Б В.1.1-4 та ДСТУ Б В.1.1-18. Протягом 5400 с проводилися вимірювання температури (рис. 4).





б

Рисунок 4 – Температурно-часова залежність за результатами: а – першого експериментального дослідження; б – другого експериментального дослідження; в – третього експериментального дослідження; щодо кожної з восьми встановлених термопар (рис. 3)

Джерело: узагальнено авторами

Аналізуючи температурно-часові залежності за результатами трьох експериментальних досліджень у вертикальному кабельному тунелі (рис. 4), можна констатувати, що найвища температура спостерігається в зоні площини D в межах 800–900 °С. Теплова енергія поширюється інтенсивніше в бік заповнення простору протилежному до заповнення отвору виходу продуктів горіння та отворів вентиляції. Температура у зоні площини С перебуває в межах 500–800 °С.

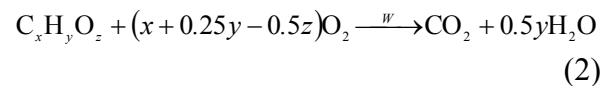
Програма «Fire Dynamics Simulator» використовувалася для вирішення широкого спектра наукових і прикладних задач тепломасоперенесення під час пожежі [10]. Fire Dynamics Simulator чисельно розв'язує рівняння Нав'є-Стокса для низькошвидкісних температурозалежних потоків. Зважаючи на складність процесів, що проходять під час пожеж у вертикальних кабельних тунелях, найбільш доцільно використовувати польові моделі, що спираються під час розрахунків на повну систему рівнянь Нав'є-Стокса. У векторному вигляді для нестисливої рідини вони записуються в такий спосіб (1):

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla P + \vec{f}, \quad (1)$$

де: $\vec{f}$ – векторне поле масових сил. Невідомі ρ і ν є функціями часу t і координати

$\vec{\Omega}$, де $\Omega \subset R^n$; $\vec{v} = (v^1, \dots, v^n)$ – векторне поле швидкостей; ∇ – оператор Гамільтона; Δ – оператор Лапласа; t – час; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості; ρ – щільність; p – тиск; $n = 2, 3$ – плоска або тривимірна область, у якій рухається рідина.

Модель горіння визначають за витратами палива, окисника і продуктів згорання [11–12]. Кількісні співвідношення визначені за узагальненим хімічним рівнянням (2):



Використовуються рівняння, що враховують радіаційний теплообмін у газовому середовищі та взаємного теплообміну між середовищем і частками, а також твердим матеріалом. Модель побудована на припущенні, що оптичне середовище ізотропне, процес радіаційного теплоперенесення описаний рівнянням (3):

$$\nabla \left(\frac{1}{\alpha + \beta} \nabla E_r \right) + 3(\alpha E_b - \alpha E_r) = 0, \quad (3)$$

де: E_r – густина енергії випромінювання; E_b – рівноважна густина енергії випромінювання.

Загалом наявні математичні моделі та їх чисельна реалізація дають змогу точно й ефективно змодельовати процес тепломасоперенесення у вертикальному кабельному тунелі атомної електростанції.

Для проведення обчислювального експерименту з використанням створеної математичної моделі для випробувань застосована наведена вище послідовність розрахункових процедур. Після завершення обчислювального

експерименту отримано дані температур з кожного місця контролю (рис. 3) для визначення адекватності математичної моделі.

Для наочності процесів прогрівання простору кабельного тунелю під час обчислювального експерименту в комп'ютерній моделі створені площини, на яких значення температури візуалізується за допомогою кольорів (залівки температури), що вказано на рис. 5.

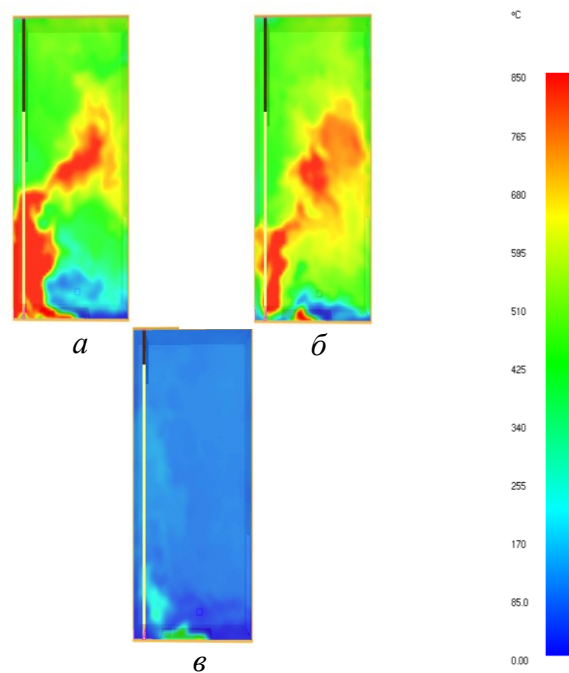


Рисунок 5 – Градієнт температур площини D (рис. 3) у просторі моделі кабельного тунелю: а – 6 хвилина, б – 12 хвилина, в – 18 хвилина

Джерело: розроблено авторами

Ураховуючи розподіл температур (рис. 5), умовно можна поділити пожежу у вертикальному кабельному тунелі на чотири етапи (рис. 6).

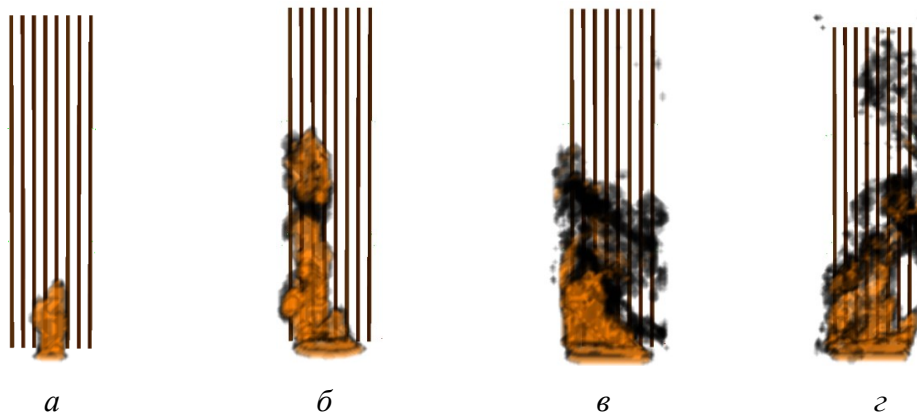


Рисунок 6 – Основні етапи розвитку пожежі у вертикальному кабельному тунелі: а – 1 етап, початковий розвиток пожежі; б – 2 етап, охоплення полум'ям кабелів на кронштейнах; в – 3 етап, перехідний до етапу розвиненої пожежі; г – 4 етап, розвинена пожежа

Джерело матеріалу: розроблено авторами

На рис. 7 побудовано графіки середньої температури в різних частинах кабельного тунелю під час обчислювального експерименту.

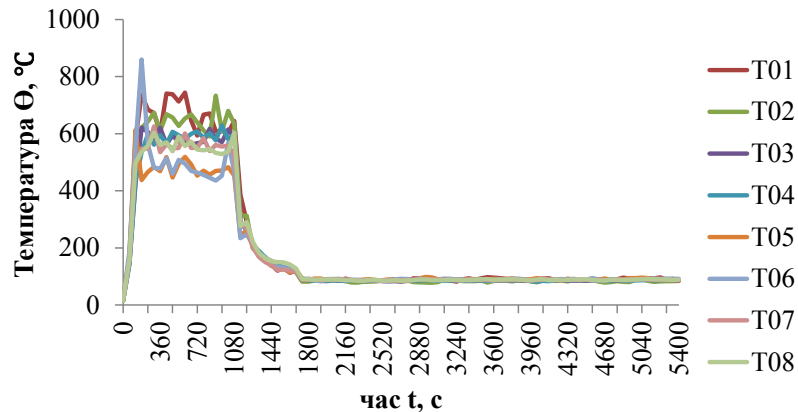


Рисунок 7 – Температурна залежність від часу у вертикальному кабельному тунелі атомної електростанції за результатами обчислюваного експерименту щодо кожної з восьми встановлених термопар

Джерело: узагальнено авторами

Для перевірки адекватності результатів моделювання використані такі критерії адекватності (4) – (9): F-критерій Фішера, t-критерій Стьюдента та Q-критерій Кохрена.

– F-критерій Фішера (4):

$$F = \frac{S_{xy}^2}{S_y^2}, \quad (4)$$

де: S_{xy}^2 – дисперсія адекватності, S_y^2 – дисперсія відтворюваності.

Дисперсія адекватності розраховувалася (5) як відхилення між розрахунковими й експериментальними даними щодо кожної з термопар, встановленої під час проведення натурального експерименту, і відповідного їй місця виміру температури в математичній моделі:

$$S_{xy}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i + y_i)^2}{n}, \quad (5)$$

де n – кількість замірів температури, y_i – значення розрахункового показника під час моделювання, x_i – значення експериментального показника під час випробування.

Дисперсія відтворюваності розраховувалася (6) як відхилення між

результатами двох натурних експериментів з урахуванням експериментальної похибки [13]:

$$S_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (|y_i - \bar{y}| - 16)^2, \quad (6)$$

де: n – кількість замірів температури, $\bar{y}$ – температура другого натурального експерименту, y_i – температура першого натурального експерименту.

– t-критерій Стьюдента, застосовується для порівняння результатів реального й обчислювального експериментів (7), (8):

$$t = \frac{\bar{y}_1 - \bar{y}_2}{\sqrt{(n_1 - 1) \cdot S_1^2 + (n_2 - 1) \cdot S_2^2}} \cdot \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2 \cdot (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}}, \quad (7)$$

$$\bar{y}_{1,2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i. \quad (8)$$

– Q-критерій Кохрена (9):

$$Q = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{i=1}^p S_i^2}. \quad (9)$$

Аналізуючи порівняння дисперсії результатів математичного моделювання процесу теплообміну під час пожежі у тунелі (табл. 1), можна констатувати, що жодне зі значень критеріїв адекватності не перевищує допустимих.

Таблиця 1. Параметри дисперсії результатів математичного моделювання процесу теплообміну під час пожежі у вертикальному кабельному тунелі від експериментальних даних

Критерії адекватності	Зона термопар (рис. 3)								Критичне значення [13]
	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	
F-критерій	0,94	0,98	1,26	1,47	2,12	1,77	1,42	1,40	2,28
t-критерій	0,58	0,11	0,68	1,13	0,73	1,38	0,43	0,13	1,65
Q-критерій	0,338	0,337	0,336	0,337	0,345	0,34	0,338	0,34	0,43

Джерело матеріалу: узагальнено авторами

Аналізуючи порівняння дисперсії результатів математичного моделювання процесу теплообміну під час пожежі у кабельному тунелі та експериментальних даних (табл.1), можна констатувати, що жодне зі значень критеріїв адекватності не перевищує допустимих, відносно відхилення складає 7,85%. Це доводить ефективність моделювання теплових процесів для проведення подальших досліджень температурних режимів пожежі у вертикальних кабельних тунелях АЕС.

Висновки і напрями подальших досліджень. З огляду на результати обчислювального експерименту і натурних випробувань розраховано критерії адекватності. За критичних значень F-критерія Фішера – 2,28, t-критерія Стюдента – 1,65, Q-критерія Кохрена – 0,43 [13] їх середні значення становили: 1,42; 0,65 та 0,33 відповідно, а максимальне значення не перевищило критичне. Аналізуючи порівняння дисперсії результатів математичного моделювання процесу теплообміну під час пожежі (табл. 1), можна констатувати, що жодне зі значень критеріїв адекватності не перевищує допустимих, а відносно відхилення складає 7,85%. Це вказує на ефективність моделювання теплових

процесів для проведення подальших досліджень температурних режимів пожежі у вертикальних кабельних тунелях атомних електричних станцій.

Зазначені дослідження спрямовані на аналіз процесу тепломасоперенесення під час реальних пожеж у вертикальних кабельних тунелях атомної електростанції. Результати цієї розвідки вказують на ефективність моделювання теплових процесів у таких умовах та мають важливе застосування в галузі безпеки атомних електростанцій. Під час проведення експерименту враховували геометричні, аеродинамічні параметри та пожежне навантаження. Отримані результати дослідження процесу тепломасоперенесення у вертикальних кабельних тунелях атомної електростанції мають практичну значущість для покращення безпеки станцій та розроблення нових технологій у галузі безпеки. Надалі роботу доцільно спрямувати на дослідження вогнестійкості будівельних конструкцій вертикальних кабельних тунелів атомної електростанції із врахуванням температурних режимів пожежі, отриманих за допомогою повного факторного експерименту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Zhang P. et al. Experimental study on the interaction between fire and water mist in long and narrow spaces. *Applied Thermal Engineering*. 2016. Т. 94. С. 706–714.
2. Nuyanzin O., Pozdieiev S., Samchenko T. [et al.]. Experimental study of temperature mode of a fire in a cable tunnel. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 3/10 (93). С. 21–27.
3. Трошкін С. Е., Неділько І. А., Удовенко М. Ю. Дослідження поведінки сталезалізобетонної плити за умови впливу стандартного температурного режиму пожежі. *Наука про цивільний захист, як шлях становлення молодих вчених* : зб. матеріалів доп. учасн. Всеукр. наук.-практ. конф. Черкаси : ЧІПБ НУЦЗУ, 2022. С. 65–66.
4. Серия норм МАГАТЭ по безопасности. Пожарная безопасность при эксплуатации атомных электростанций. № NS-G-2.1.
5. EN 1991-1-2:2010 Eurocode 1 : Actions on structures. Part 1–2 : General actions – Actions on structures exposed to fire.
6. EN 1992-1-2:2005 Eurocode 2 : Design of concrete structures. Part 1–2 : General rules – Structural fire design, Brussels, 2004.
7. Chapter VII.4 «Fire resistance of structures» of technical report 1999 05.05.B «Fire and Smoke Control in Tunnels».
8. Трошкін С. Э., Сидней С. А., Тищенко Е. А., Некора О. В. Исследование адекватности результатов математического моделирования динамики пожара в помещении с помощью программного комплекса FDS. *Пожарная безопасность : теория и практика*. Черкассы : ЧІПБ, 2015. № 20. С. 104–109.

9. Ковалишин В. В. Перевірка на адекватність моделювання процесів розвитку і гасіння пожеж в кабельних тунелях (в обмежених об'ємах). *Науковий вісник Українського науково-дослідного інституту пожежної безпеки*. Київ : УкрНДІПЗ, 2013. № 1(27). С. 38–44.
10. Forney G. P. User's Guide for Smokeview Version 5-A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data : National Institute of Standards. P. 234.
11. Основи теорії розвитку і припинення горіння : підруч. / Г. І. Єлагін, Г. І. Єлагін, М. Г. Шкарабура, М. А. Кришталь, О. М. Тищенко. Вид. 3-тє, випр. і доп. Черкаси : Академія пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля, 2013. 460 с.
12. Методи математичного моделювання теплових процесів при випробуваннях на вогнестійкість залізобетонних будівельних конструкцій : монографія / О. М. Нуянзін, О. В. Некора, С. В. Поздєєв [та ін.]. Черкаси : ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2019. 120 с.
13. Організація наукових досліджень (Статистичні методи. Аналіз та оформлення наукових досліджень) : методичні вказівки до науково-дослідницької практики з дисципліни / І. І. Капцов та ін. Харків : ХНАМГ, 2009. 59 с.

REFERENCES

1. Zhang, P. et al. Experimental study on the interaction between fire and water mist in long and narrow spaces. *Applied Thermal Engineering*. 2016. Т. 94. С. 706–714.
2. Nuyanzin, O., Pozdieiev, S., Samchenko, T. et al. Experimental study of temperature mode of a fire in a cable tunnel. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 3/10 (93). С. 21–27.
3. Troshkin, S. E., Nedilko, I. A., Udovenko, M. Yu. Doslidzhennia povedinky stalezalizobetonnoi plyty za umovy vplyvu standartnoho temperaturnoho rezhymu pozhezh. *Nauka pro tsyvilnyi zakhyst, yak shliakh stanovlennia molodykh vchenykh: zb. materialiv dop. uchasn. Vseukr. nauk.-prakt. konf. Cherkasy: ChIPB NUTsZU*, 2022. S. 65–66.
4. Seryia norm MAHATQ po bezopasnosty. Pozharnaia bezopasnost pry ekspluatatsii atomnykh elektrostantsyi. № NS-G-2.1.
5. EN 1991-1-2:2010 Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions -Actions on structures exposed to fire.
6. EN 1992-1-2:2005 Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-2: General rules – Structural fire design, Brussels, 2004;
7. Chapter VII.4 «Fire resistance of structures» of technical report 1999 05.05.B «Fire and Smoke Control in Tunnels».
8. Troshkin, S. E., Sydnei, S. A., Tyshchenko, E. A., Nekora, O. V. Yssledovanye adekvatnosti rezultatov matematycheskogo modelirovaniya dynamiki pozhara v pomeshcheniy s pomoshchiu proghrammnoho kompleksa FDS // *Pozharnaia bezopasnost: teoriya y praktyka* – Cherkassy: ChYPB, 2015 (20), S.104 –109.
9. Kovalyshyn, V. V. Perevirka na adekvatnist modeliuvaniia protsesiv rozvytku i hasinnia pozhhez v kabelnykh tuneliakh (v obmezhenykh ob'iemakh // *Naukovyi visnyk Ukrainskoho naukovo-doslidnoho instytutu pozhheznoi bezpeky*. Kyiv: UkrNDITsZ, 2013. № 1(27). S. 38–44.
10. Forney, G. P. User's Guide for Smokeview Version 5-A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data: National Institute of Standards. P. 234.
11. Yelahir, H. I., Yelahir, H. I., Shkarabura, M. H., Kryshthal, M. A., Tyshchenko, O. M. Osnovy teorii rozvytku i prypynennia horinnia: pidruchnyk / 3-tie vyd., vypr. i dop. Cherkasy: Akademiia pozhheznoi bezpeky imeni Heroiv Chornobylia, 2013. 460 s.;
12. Nuianzin O. M., Nekora O. V., Pozdieiev S. V. [ta in.]. Metody matematychnoho modeliuvaniia teplovykh protsesiv pry vyprobuvanniakh na vohnestiikist zalizobetonnykh budivelnnykh konstruksii: monohrafiia. Cherkasy: ChIPB im. Heroiv Chornobylia NUTsZ Ukrainy, 2019. 120 s.
13. Metodichni vkazivky do naukovo-doslidnytskoi praktyky z dystsypliny «Orhanizatsiia naukovykh doslidzhen» (Statystychni metody. Analiz ta oformlennia naukovykh doslidzhen) / I. I. Kaptsov ta in. Kharkiv: KhNAMH, 2009. 59 s.

DETERMINATION OF ADEQUACY OF MATHEMATICAL MODELS FOR HEAT TRANSFER DURING FIRE INCIDENTS IN VERTICAL CABLE TUNNELS OF NUCLEAR POWER PLANTS

S. Troshkin, S. Pozdieiev, O. Nekora, A. Belikov

¹*Cherkasy Institute of Fire Safety named after the Heroes of Chernobyl, National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine*

²*Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Dnipro, Ukraine*

KEYWORD

S:

nuclear power plant, containment, vertical cable tunnel, mathematical modeling, natural experiment, adequacy criterion, fire temperature regime.

ANNOTATION

The aim of this research is to identify the characteristics of heat transfer processes during real fires in vertical cable tunnels of nuclear power plants. Studying the adequacy of constructed mathematical models will enable the assessment of the effectiveness of thermal process modeling for use in researching the fire resistance of vertical cable tunnel enclosures in nuclear power plants. To achieve this goal, natural experiments were conducted and data on the temperature dynamics in a vertical cable tunnel with known geometric parameters and fire loads were obtained at the training and sports complex of the 1st State Fire and Rescue Unit of the Main Directorate of the State Emergency Service of Ukraine in Zaporizhzhia Region. A mathematical model of the vertical cable tunnel, similar to the physical one, was created in the Fire Dynamics Simulator software, followed by a computational experiment. Modeling, as a method of scientific research, allows for conducting all necessary experiments regarding the determination of temperature regimes during fires in vertical cable tunnels without the need for expensive and labor-intensive physical experiments on models. Based on the results of the computational experiment and natural tests, adequacy criteria were calculated. Fisher, Student, and Cochran criteria are used to validate the constructed mathematical model. An analysis of the adequacy of the mathematical models used was conducted. By comparing the dispersion of the results of mathematical modeling of the heat and mass transfer process during a fire, it can be observed that none of the adequacy criteria values exceeded permissible limits, and the relative deviation was 7.85%, indicating the effectiveness of modeling thermal processes for further research into temperature regimes during fires in vertical cable tunnels of nuclear power plants. This work contributes to the further application of computational experiments for studying heat and mass transfer processes during fires in vertical cable tunnels of nuclear power plants.

УДК 614:89

ВИМОГИ ДО ЕКІПРУВАННЯ РЯТУВАЛЬНИКІВ ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ АВАРІЙНО-РЯТУВАЛЬНИХ РОБІТ В ОСЕРЕДКУ НАДЗВИЧАЙНОЇ СИТУАЦІЇ З ВИЛИВОМ (ВИКИДОМ) РАДІОАКТИВНИХ ТА НЕБЕЗПЕЧНИХ ХІМІЧНИХ РЕЧОВИН

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2.162-172>

Калиненко Л. В*, ORCID iD 0000-0002-2507-4183

Андрієнко М. В., ORCID iD 0000-0002-9222-4831

Слущька О. М., ORCID iD 0000-0003-1723-8181

*E-mail: lkalynenko@gmail.com

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції:

24.09.2023

Пройшла рецензування:

20.10.2023

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

осередок надзвичайної ситуації з виливом (викидом) радіоактивних, небезпечних хімічних речовин та біологічних патогенних агентів, застосування зброї масового ураження, вимоги до захисту рятувальників, комплекти засобів індивідуального захисту.

АНОТАЦІЯ

Зараз Україна перебуває в ситуації, що потребує наявності високоефективної системи захисту від радіаційного, хімічного та біологічного (далі – РХБ) зараження (забруднення) не тільки в ЗСУ, а й у ДСНС України. Технічна відповідність сучасних засобів індивідуального захисту (далі – ЗІЗ) має ефективно протистояти можливим загрозам не тільки під час НС, а й в умовах застосування засобів масового ураження (далі – ЗМУ), під час дій в районах РХБ зараження або забруднення внаслідок терористичних дій та руйнування підприємств атомної енергетики та хімічної промисловості. З огляду на це важливого значення набуває екіпування рятувальників ЗІЗ. У статті зазначено, що забезпечення особового складу аварійно-рятувальних формувань ЗІЗ під час дій в зонах радіоактивного, хімічного забруднення чи біологічного зараження, своєчасне і вміле їх використання є не менш важливим, ніж правильна організація роботи з урахуванням захисту «часом та відстанню», тобто умінням чітко і злагоджено, з використанням маніпуляторів і допоміжної техніки швидко виконувати необхідні роботи в аварійному осередку, щоб зменшити можливі дози опромінення чи рівні забруднення. Водночас дуже важливо, аби ЗІЗ мали необхідні технічні характеристики щодо захисту як органів дихання, так і шкіри та очей. Нині таких засобів в Україні доволі багато, проте вони мають відповідати низці вимог, які автори охарактеризували у статті. Комплекти ЗІЗ на сьогодні є найбільш ефективним спорядженням, що використовують рятувальники аварійно-рятувальних служб і формувань під час робіт у зонах із різною концентрацією радіоактивних речовин, небезпечних хімічних, біологічних, бойових отруйних речовин, продуктів згоряння. Наведено класифікацію таких комплектів, їх склад та рекомендації щодо комплектування. Організації та підприємства, що здійснюють проектування і виготовлення комплектів ЗІЗ, а також органи виконавчої влади, органи місцевого самоврядування, інші державні органи, організації та підприємства усіх форм власності, що забезпечують реалізацію державної політики у сфері цивільного захисту, організують забезпечення рятувальників та особового складу спеціалізованих служб цими комплектами у разі загрози виникнення НС або застосування зброї масового ураження, мають потребу в нормативному документі, в якому встановлюються вимоги до комплектів ЗІЗ.

Постановка проблеми.

Забезпечення безпеки і захисту особового складу аварійно-рятувальних формувань під час дій в зонах радіоактивного, хімічного забруднення чи біологічного зараження досягається безперервним веденням радіаційно-хімічної, біологічної розвідки та своєчасним і вмілим використанням засобів індивідуального захисту. Під час проведення аварійно-рятувальних робіт у таких зонах рятувальники повинні бути забезпечені засобами індивідуального захисту з необхідними технічними характеристиками щодо захисту як органів дихання, так і шкіри та очей. Сьогодні таких засобів на ринку доволі багато. Їх вибір досить великий, проте набагато зручніше для користувачів, якщо такі ЗІЗ скомпоновані в одному комплекті. Залежно від видів і рівнів хімічного, радіонуклідного чи біологічного забруднення набір засобів індивідуального захисту в комплектах має бути різний, внаслідок чого виникає необхідність наукового обґрунтування підходів до формування таких комплектів ЗІЗ, що автори й спробували висвітлити у цій статті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання виробництва, зберігання, організації роботи в ЗІЗ, проблемні аспекти їх використання були предметом вивчення багатьох дослідників. Спираючись на науково обґрунтовані положення, можна вважати, що в загальному розумінні засоби індивідуального захисту – це засоби, що призначені для унеможливлення або суттєвого зменшення впливу на людину небезпечних і шкідливих чинників, як і визначають В. Голінько, Л. Третьякова, С. Чеберячко [1]. Що ж до трудового процесу і виробничого середовища, то саме таких чинників, які існують на робочому місці, а основне робоче місце рятувальника – це місце надзвичайної ситуації.

Організації застосування ЗІЗ під час викиду радіоактивних і небезпечних хімічних речовин (далі – НХР) присвячена дисертаційна робота С. Говаленкова «Попередження надзвичайних ситуацій, зумовлених техногенним викидом в

атмосферу небезпечних легких газоподібних хімічних речовин» [2], що виконана в Національному університеті цивільного захисту України, та робота Л. Третьякової «Розвиток наукових основ створення захисного одягу для працівників атомних електричних станцій» [3], виконана та захищена в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут».

Здійснивши аналіз надзвичайних ситуацій (далі – НС), що супроводжуються викидом НХР, С. Говаленков констатує, що «...одним з найважливіших факторів зменшення кількості постраждалих є скорочення часу евакуації людей із зон ураження НХР». Дослідник вказує на основний чинник, що впливає і скорочує час евакуації людей із зони НС: «...використання різних засобів рятувальників у зонах хімічного забруднення». Він доводить, що ефект зі скорочення часу евакуації із зон НС «...може бути досягнуто за рахунок скорочення часу на проведення розвідки і *такого вибору комплексу засобів індивідуального захисту, який забезпечує достатній захист і при цьому дозволяє рятувальникам ефективніше виконувати поставлені задачі щодо евакуації постраждалих із зони ураження*» (виділено нами – авт.). Крім того, науковець зауважує: «...тільки особовий склад, який безпосередньо бере участь у ліквідації аварії, потребує засобів з максимальним захистом (такій комбінації ізолюючого костюма і ізолюючого апарату, коли останній знаходиться усередині захисного одягу). На великих відстанях (під час проведення, наприклад, робіт з постановки водних завіс) рятувальники можуть бути в ізолюючих апаратах поверх захисного одягу» [4]. На наш погляд, вказане має суттєве значення для рятувальної практики Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту, організації забезпечення засобами індивідуального захисту органів дихання (далі – ЗІЗОД) особового складу під час ліквідації НС іншими ЗІЗ, може бути підґрунтям для внесення змін до чинних нормативних актів, зокрема стандартів із розроблення нових захисних засобів.

У дисертаційній роботі на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук «Розвиток наукових основ створення захисного одягу для працівників атомних електричних станцій» Л. Третьякова наголошує, що робота на радіаційно небезпечних об'єктах та в аварійних осередках завжди потребує підвищеної уваги до здоров'я та життя працівників. Такі роботи здійснюються під постійним впливом α -, β - та γ -випромінювань, які формують ефективну дозу опромінювання. Окрім іонізуючого випромінювання, на працівників впливає низка інших небезпечних і шкідливих виробничих чинників (далі – НШВЧ): хімічні (пропан, бутан, ацетилен, соляна та сірчана кислоти, хлор, луги, ацетон, аміак, вода, нафтопродукти, фіброгенні аерозолі, пил); фізичні (механічні навантаження, шум, статична електрика, електромагнітне і теплове випромінювання). За недостатності техніко-організаційних заходів мінімізації впливу НШВЧ можна досягти завдяки використанню комплектів засобів індивідуального захисту, основним складником яких є захисний одяг (далі – ЗО) [3].

Наступна робота, підготовлена В. Юрченком та О. Соколовським вже після повномасштабного збройного вторгнення Росії в Україну, присвячена виробництву більш надійних ЗІЗ, у тому числі ЗІЗОД, для населення й оснащення формувань цивільного захисту [4]. Автори з огляду на аналітичні матеріали ДСНС України та інші наводять такі дані: в Україні налічується близько 24 тис. потенційно небезпечних об'єктів і ще понад 12 тис. об'єктів підвищеної небезпеки, виробництво яких може несе значну техногенну загрозу через використання небезпечних хімічних і радіоактивних речовин. Що ж до ЗІЗОД, то ці науковці підвищення ефективності вбачають у збільшенні періоду захисної дії таких властивостей, як ізолювальна та захисна дія фільтрів. Зважаючи на узагальнення досвіду інших країн, у дослідженні наголошується на доцільності забезпечення універсальності засобів індивідуального захисту.

У колективній роботі «Удосконалення клапанних систем

фільтрувальних респіраторів», що підготували С. Чеберячко, Ю. Чеберячко, О. Дерюгін, І. Книш та О. Пищикова, зокрема йдеться про мету, яка задається конструкцією ЗІЗОД – «...забезпечення найкращих захисних та ергономічних показників для користувачів», та основні конструктивні недоліки ЗІЗОД, а саме: використання неякісних матеріалів (під час їх виготовлення) чи незабезпечення герметичності елементів ЗІЗОД, що контактують між собою з огляду на клапан вдиху / видиху. Дослідники підкреслюють, покращення якості захисних властивостей фільтрувальних ЗІЗОД має бути забезпечене за допомогою виробництва більш досконалих клапанних систем [5]. Це першочергово має враховуватись у нормативних документах з питань цивільного захисту.

Підкреслюють важливість застосування надійних ЗІЗ під час ліквідації НС В. Ковалишин, В. Луц, Р. Пархоменко – автори навчального посібника «Основи підготовки газодимозахисника», де ЗІЗОД присвячений окремий розділ – «Організація роботи ланок газодимозахисної служби. Правила безпеки при роботі в засобах індивідуального захисту органів дихання і зору». Науковці підготували її з огляду на те, що «...гасіння пожеж та ліквідація надзвичайних ситуацій з проведенням аварійно-рятувальних робіт у загазованих і задимлених середовищах без застосування засобів індивідуального захисту органів дихання і зору пожежників, і тих, кого рятують, було б неефективне та до певної межі неможливе» [6]. Зазначене не раз підтверджено рятувальною практикою.

Ю. Чеберячко – автор дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук «Розвиток теорії конструювання та вдосконалення процесів індивідуального підбору і використання протипилових респіраторів». Він присвятив її вирішенню цієї актуальної науково-технічної проблеми, розробленню фільтрувальних ЗІЗОД, поставивши за мету удосконалення запобігання професійним захворюванням пилової етіології працівників гірничої галузі. Науковець згідно з підсумками

дослідження, зокрема, наголошує, «...що існуючі ЗІЗОД мають захисну ефективність значно нижчу, ніж та, яка потенційно можлива, виходячи із захисних властивостей використаних фільтрів». Крім цього, Ю. Чеберячко обґрунтовує й основну причину зазначеного – це «...низькі ізолювальні властивості через велике різноманіття антропометричних характеристик облич користувачів». Він пропонує застосувати теоретичні підходи до розроблення наукових засад, що забезпечили б належне розроблення ЗІЗОД, їх експериментальну оцінку, оперативний контроль ефективності тощо [7].

Формулювання цілей дослідження. Метою цього дослідження є висвітлення основних вимог до комплектів засобів індивідуального захисту (далі – КЗІЗ) рятувальників від небезпечних хімічних і радіоактивних речовин та біологічних патогенних агентів під час проведення аварійно-рятувальних робіт в умовах надзвичайних ситуацій чи застосування зброї масового ураження.

Методи дослідження. У процесі дослідження використовуються такі загальнонаукові методи, як аналіз, синтез, абстрагування, узагальнення, порівняння. Аналіз дає нам можливість детально і всебічно вивчити питання забезпечення безпеки особового складу у сфері цивільного захисту через розчленування предмета забезпечення безпеки на складові частини. Синтез, навпаки, розширює попередній досвід, виходячи за межі наявної основи. Абстрагування дає змогу подумки виділити найбільш суттєве після порівняння та узагальнення підходів до організації безпечних умов праці рятувальників.

Виклад основного матеріалу. Основними критеріями вибору ЗІЗ для використання під час проведення робіт з ліквідації наслідків радіаційних чи хімічних аварій повинні бути [8]:

- очікувані або фактичні концентрації небезпечних хімічних та радіоактивних речовин у повітрі під час проведення робіт;
- рівні радіоактивного забруднення поверхонь;

- можливість забруднення радіоактивними розчинами або контакту з паровою сумішшю під час використання для дезактивації пароежекторних розпилювачів;

- категорія важкості та тривалість виконання робіт;

- мікроклімат на робочих місцях та газовий склад повітря (температура, вологість, вміст у повітрі кисню, наявність токсичних та вибухонебезпечних газових сумішей тощо).

Під час проведення короткотермінових робіт у зоні суворого режиму (за високих значень потужності дози гамма-випромінювання) слід віддавати перевагу вибору зразків ЗІЗ, що менше впливають на функціональні системи організму людини.

Безпосередньо в аварійній ситуації персонал діє відповідно до спеціально розроблених планів, використовує аварійні комплекти ЗІЗ з урахуванням хімічного чи радіаційного стану в осередку аварії. Водночас особлива увага має приділятися індивідуальному захисту органів дихання особового складу та організації зберігання аварійних комплектів ЗІЗ, що дає змогу забезпечити ними персонал у мінімальні терміни.

Індивідуальний захист персоналу, який залучається до проведення робіт з ліквідації наслідків радіаційних і хімічних аварій, залежно від масштабів аварії, радіаційної (хімічної) ситуації, що склалася, та характеру робіт, що виконуються, має містити такі основні елементи [9–10]:

- уточнення регламентації застосування ЗІЗ з урахуванням радіаційної обстановки, умов і характеру проведення конкретних робіт;

- інструктаж і перевірка готовності персоналу до використання ЗІЗ;

- організацію своєчасного надівання (респираторів, протигазів, ізолювальних дихальних апаратів, ізолювальних костюмів, додаткового спецодягу із прорезинених або плівкових полімерних матеріалів, спецвзуття, засобів захисту рук) та контроль за їх використанням упродовж проведення робіт у першій зоні до їх закінчення та виходу із зони;

- запобігання поширенню радіоактивного чи хімічного забруднень за допомогою облаштування й використання санітарних шлюзів або санітарних бар'єрів на межах зон та організація повного переодягання персоналу щодня після проведення робіт із ліквідації наслідків аварії з обов'язковою санітарною обробкою та радіометричним контролем шкірних покривів у санпропускниках;

- організацію збору і дезактивації забрудненого спецодягу та додаткових ЗІЗ і за необхідності їх поховання;

- забезпечення технічного обслуговування ЗІЗ (особливо ЗІЗ органів дихання та ізолювальних костюмів): збереження, видавання, приймання після використання, очистка, перевірка справності, ремонтування тощо;

- матеріально-технічне забезпечення всіх заходів з індивідуального захисту персоналу.

Основними особливостями, які визначають організацію індивідуального захисту під час ліквідації наслідків масштабних радіаційних аварій, є:

- високий рівень радіоактивного, хімічного забруднення чи біологічного зараження поверхонь та повітря;

- необхідність виконання робіт в умовах суворого обмеження часу внаслідок великої потужності дози гамма-випромінювання в багатьох місцях проведення робіт;

- граничні фізіологічні та психологічні навантаження на організм працюючих;

- необхідність одночасного вирішення питань індивідуального захисту великого контингенту персоналу, який бере участь в ліквідації наслідків аварії.

Для організації робіт у зонах радіаційної аварії необхідно використовувати положення, які викладені в нормативних та методичних документах [11–15].

Основними шкідливими факторами, які визначають необхідність застосування засобів індивідуального захисту в умовах радіаційних і хімічних аварій, є надходження радіоактивних та хімічних речовин до організму людини та радіоактивне забруднення покривів шкіри, яке зумовлюється радіоактивним, хімічним

забрудненням чи бактеріологічним зараженням місцевості, поверхонь різних об'єктів та повітря.

Основною метою комплексу заходів з організації індивідуального захисту рятувальників, які проводять роботи в аварійних осередках, є:

- унеможливлення або зниження встановлених згідно з нормативними документами допустимих величин надходження в організм людини небезпечних хімічних речовин чи радіонуклідів, а також хімічного чи радіоактивного забруднення шкіри персоналу, який бере участь у рятувальних роботах та ліквідації наслідків аварії;

- запобігання поширенню хімічного, радіоактивного забруднення за межі зони аварії через забруднений одяг, взуття та інші ЗІЗ.

В умовах високих рівнів забруднення поверхонь бета-активними радіонуклідами необхідне застосування додаткових ЗІЗ, що дають змогу суттєво знизити опромінення шкірних покривів та кришталіка ока людей.

Необхідно пам'ятати, що застосування комплектів ЗІЗ не дає можливості забезпечити захист персоналу від зовнішнього гамма-опромінення. Це завдання вирішується лише через використання захисних інженерних споруд та пристроїв (укриттів, сховищ, захисних екранів), а також механізмів для дистанційного проведення робіт та суворе обмеження часу перебування рятувальників в осередку з високим рівнем потужності дози гамма-випромінювання.

Організація застосування ЗІЗ має проводитися в комплексі з іншими заходами радіаційної безпеки, такими як йодна профілактика та вживання інших захисних фармпрепаратів (медичних засобів захисту). Порядок їх застосування передбачений у відповідних нормативно-технічних документах [11–15].

Для забезпечення ефективного індивідуального захисту аварійного персоналу в умовах радіаційних аварій має постійно підтримуватися аварійна готовність, зокрема:

- вибір, комплектування, розміщення, регламентація застосування в аварійних

ситуаціях та підтримування у постійній готовності аварійних комплексів ЗІЗ;

- навчання персоналу та розвиток навичок щодо правил користування аварійними комплексами ЗІЗ із обов'язковою перевіркою готовності персоналу до застосування ЗІЗ;

- забезпечення можливості розгортання додаткових санітарних пропускників та санітарних шлюзів;

- забезпечення можливості дезактивації спецодягу та інших ЗІЗ, які були забруднені під час наслідків аварії.

Організуюючи індивідуальний захист, необхідно враховувати, що нарівні із захисним ефектом деякі види ЗІЗ чинять небажаний вплив на функціональні системи організму людини, ускладнюючи його теплообмін з навколишнім середовищем або створюють ускладнення для дихання, тиск ЗІЗ на м'які тканини голови, обмеження поля зору та слуху, або погіршення розбірливості мови тощо. Ці фактори мають особливо велике значення під час виконання робіт із використанням ЗІЗ у несприятливих кліматичних умовах навколишнього середовища та під час виконання важких робіт у протигазах або ізолювальних костюмах. Застосування протигазів суттєво підвищує важкість робіт. Зазначене зумовлює необхідність попередніх тренувань персоналу та суворого дотримання режиму праці та відпочинку.

Для забезпечення та підтримки працездатності, ефективної діяльності та безпеки особового складу підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту ДСНС України під час виконання робіт у ЗІЗ встановлюються режими робіт, що враховують їх характер і складність, тип (марку) ЗІЗ, час захисної дії, вік, фізіологічно-гігієнічні особливості праці людини у ЗІЗ в екстремальних умовах, прогноз можливих доз опромінення особового складу [16].

З метою захисту рятувальників, діяльність яких пов'язана із виконанням аварійно-рятувальних робіт в умовах радіоактивного, хімічного забруднення та біологічного зараження, необхідно використовувати комплекти ЗІЗ. Вони призначені для запобігання негативному впливу на тіло, органи дихання, слух та зір

людини пилу, аерозолів, парів, газів, рідких радіоактивних речовин, небезпечних хімічних речовин, біологічних патогенних агентів як штучного, так і природного походження, а також небезпечних для людини забруднень, що утворюються внаслідок застосування ЗМУ.

Залежно від видів і рівнів хімічного та радіонуклідного забруднення набір засобів індивідуального захисту в комплектах може бути різний. Якість ЗІЗ та ЗО, що входять до складу комплектів, має надати змогу щодо накопичення та тривалого зберігання їх у готовності до застосування. Для формування таких комплектів автори розробили низку вимог та рекомендацій.

Застосовано нові підходи до класифікації цих комплектів. За основу взято класифікацію видів радіаційно небезпечних робіт, згідно з якою перший клас – це роботи, що виконуються у найбільш небезпечних та шкідливих умовах і потребують найвищого рівня захисту. Відповідно й комплекти ЗІЗ рятувальників, що належать до першої категорії, забезпечують захист під час виконання робіт безпосередньо на аварійному об'єкті або на відстані менше ніж 50 м від джерела забруднення, де наявне хімічне, радіоактивне забруднення чи біологічне зараження, або у разі забруднення чи зараження повітря, безпосереднього контакту з твердою або рідкою небезпечною хімічною чи радіоактивною речовиною, або у разі впливу низьких чи високих температур, відкритого полум'я тощо. До комплектів другої та третьої категорій вимоги висувуються менш жорсткі. Таким чином, комплекти ЗІЗ рятувальників за рівнем захисних властивостей поділяють на три категорії.

Комплект ЗІЗ першої категорії. Комплект призначений для виконання рятувальниками робіт у зоні хімічного, радіоактивного забруднення чи біологічного зараження або у разі забруднення чи зараження повітря; безпосереднього контакту з твердою або рідкою небезпечною хімічною чи радіоактивною речовиною; впливу низьких або високих температур, відкритого полум'я; механічного впливу. Комплект ЗІЗ

першої категорії рекомендований для використання рятувальниками, які пройшли професійну підготовку, безпосередньо на аварійному об'єкті або на відстані менше ніж 50 м від джерела забруднення.

До складу комплекту ЗІЗ першої категорії належать: ізолювальний ЗІЗОД (автономні регенерувальні дихальні апарати зі стисненим киснем, або зі стисненим киснем і азотом, або на хімічно зв'язаному кисні, або апарати дихальні автономні резервуарні зі стисненим повітрям); захисний ізолювальний костюм; захисний фільтрувальний костюм; гігієнічна вологопоглинальна білизна; гумове та шкіряне спеціальне взуття; гумові, шкіряні, брезентові та бавовняні рукавиці; додаткові засоби індивідуального захисту (бахили, нарукавники, костюми короточасного застосування, гумові рукавички тощо). Цей комплект використовують з автономною системою життєзабезпечення або без неї.

Комплекти ЗІЗ другої категорії. Комплект ЗІЗ другої категорії призначений для захисту рятувальників у зоні хімічного, радіоактивного забруднення чи біологічного зараження або у разі забруднення повітря продуктами згоряння. Використовують у радіусі від 50 м до 500 м від джерела забруднення чи зараження та призначений для рятувальників, які пройшли професійну підготовку.

До складу комплекту ЗІЗ другої категорії належать: фільтрувальний ЗІЗОД; захисний ізолювальний костюм; захисний фільтрувальний костюм; спідня білизна чоловіча; гумове та шкіряне спеціальне взуття; гумові, шкіряні, брезентові та бавовняні рукавиці.

Комплект ЗІЗ третьої категорії. Комплект ЗІЗ третьої категорії призначений для перебування рятувальників і населення у зоні з невисокою концентрацією хімічного, радіоактивного забруднення чи зараження біологічними патогенними агентами. Цей комплект рекомендований для захисту на

відстані понад 500 м від джерела забруднення чи зараження для рятувальників та населення.

До складу комплекту ЗІЗ третьої категорії належать: фільтрувальний ЗІЗОД; захисний фільтрувальний костюм; гумове та шкіряне спеціальне взуття, гумові, шкіряні, брезентові та бавовняні рукавиці.

Вибір категорії комплекту ЗІЗ здійснюється на підставі висновків з оцінки обстановки залежно від виду забруднення (зараження), важкості та тривалості виконуваних робіт.

Комплекти ЗІЗ рятувальників повинні відповідати вимогам, наведеним у табл. 1. Залежно від наявності та рівнів забруднення повітря радіоактивними аерозолями та НХР до складу комплекту добираються різні види ЗІЗОД, починаючи від респіраторів та завершуючи ізолювальними.

Якщо для ліквідації аварійної ситуації необхідний доступ персоналу в приміщення, бокси, ємності, цистерни, колодязі, в яких є імовірність наявності атмосфери, непридатної для дихання внаслідок недостатності кисню або високих концентрацій (більш 0,5%) пароподібних токсичних речовин, то як ЗІЗ органів дихання повинні використовуватися ізолювальні дихальні апарати або шлангові ЗІЗ.

Розвідка в осередку аварії з виливом (викидом) НХР проводиться тільки з використанням ізолювальних засобів індивідуального захисту органів дихання та шкіри.

Для захисту від впливу отруйних, токсичних рідин та аерозолів, їдкого або отруйного пилу та впливу розчинів кислот низької концентрації, нафтопродуктів, засобів із догляду за рослинами, зокрема гербіцидів та пестицидів, використовують комплекти категорій 1, 2. Для захисту від впливу неотруйних та нетоксичних аерозолів, їдкого пилу та розчинів кислот низької концентрації застосовують комплекти категорії 3.

Таблиця 1 – Вимоги до комплектів ЗІЗ рятувальників [узагальнено авторами]

№ з/п	Найменування вимог	Нормативний документ, яким проводиться випробування	Значення параметра для комплектів ЗІЗ рятувальників за категоріями		
			1	2	2
1	Тривалість роботи рятувальника (хв), який виконує дозоване фізичне навантаження з енерговитратами 320 Вт за температури 25 °С та режиму: 20 хв – праця, 10 хв – відпочинок	СОУ МНС 75.2-00013528-006 [6]	60	120	240-360
2	Час захисної дії комплекту від аерозолю, пари чи газу небезпечної речовини, хв	ДСТУ EN 143, ДСТУ EN 943-1, ДСТУ EN 1073-2	60	120	240-360
3	Захист від рідкої фази небезпечної речовини за винятком затікання до конструктивних елементів комплекту, хв, більше ніж:	ДСТУ EN 13034			
	для рук і ніг;		20	7	-
	для голови і тіла		20	2	-
4	Захист від обливання небезпечною речовиною, більше ніж, хв	ДСТУ EN 13034	10	-	-
5	Стійкість до інфрачервоного випромінювання з інтенсивністю 0,33 кал/см ² ·с за температури навколишнього повітря 200 °С, хв.	ДСТУ EN ISO 9151, ДСТУ EN ISO 6942	10	-	-
6	Захист від відкритого полум'я, с	ДСТУ EN ISO 15025	10	-	-
7	Час переведення комплекту з положення «напоготові» у «бойове», не більше ніж, с	[16]	300	300	10
8	Кратність оброблення матеріалів ЗІЗ знезаражувальним (дегазувальним, дезінфекційним) розчином, разів, не менше ніж: після впливу рідкої фази небезпечної речовини; після впливу парової (газової) фази небезпечної речовини	ДСТУ EN 13034, ДСТУ EN 943-1, ДСТУ EN 1073-2, ДСТУ EN 14126	1 5	- 5	
9	Опір диханню у разі навантаження середньої важкості (30 л/хв), мм вод. ст. для ізолювальних ЗІЗОД, не більше ніж	ДСТУ EN 145, ДСТУ EN 137	50	50	
10	Температура повітря, що вдихається, не вище ніж, °С	ДСТУ EN 529	40	40	
11	Об'ємний вміст двоокису вуглецю у повітрі, що вдихається, не більше ніж, %	ДСТУ EN 143, ДСТУ EN 14387	2,0	2,0	
12	Маса комплекту ЗІЗ, не більше ніж, кг	СОУ МНС 75.2-00013528-006	25*	15*	3
13	Час технічного обслуговування комплекту ЗІЗ після перебування в ньому не більше ніж, хв	СОУ МНС 75.2-00013528-006	60	60	3

* Якщо маса дихальних апаратів не більше ніж 12,5 кг

Для захисту рятувальників від високих концентрацій парів НХР, а також в умовах високої димозагазованості атмосфери після пожеж, вибухів і горіння речовин, застосовують ізолювальні ЗІЗОД. Також їх вибирають, якщо:

- склад і концентрація речовин невідомі;

- вміст вільного кисню в повітрі менше ніж 16 об'ємних відсотків;

- час захисної дії інших ЗІЗОД недостатній для виконання завдань у зоні зараження.

Для комплексного захисту особового складу під час гасіння пожежі в осередку, де концентрація аерозолів більше ніж 200 ДКА, потужне бета- та наявне гамма-випромінювання, особливо в приміщеннях із товстими стінами, необхідно передбачити використання спеціальних комплектів одягу радіаційного

захисту для пожежників. Комплект містить гігієнічну вологопоглинальну білизну, жилет, що захищає від радіації, накидку, штани і чоботи, тепло- і радіоізолювальний захисний халат, зовнішній костюм / комбінезон з рукавичками і чоботами. Дихальний апарат зі стиснутим повітрям, який носять поверх костюма / комбінезона, що продовжує допустимий час роботи в таких умовах завдяки швидкій заміні балона. В осередку НС, де немає радіоактивного забруднення, дихальний апарат зі стиснутим повітрям або регенерувальний дихальний апарат зі стисненим киснем можна носити всередині костюма для збільшення коефіцієнта захисту комплекту ЗІЗ рятувальників.

Під час проведення розмінування на забруднених територіях необхідно використовувати спеціальне вибухозахисне екіпірування та спорядження.

Висновки та напрями подальших досліджень. З метою захисту рятувальників, діяльність яких пов'язана із виконанням аварійно-рятувальних робіт в умовах радіоактивного, хімічного забруднення та біологічного зараження, необхідно використовувати комплекти ЗІЗ. Вони призначені для запобігання негативному впливу на тіло, органи дихання, слух та зір людини пилу, аерозолів, парів, газів, рідких радіоактивних речовин, небезпечних хімічних речовин, біологічних патогенних агентів як штучного, так і природного походження, а також небезпечних для людини забруднень, що утворюються внаслідок застосування ЗМУ. Для формування таких комплектів автори розробили низку вимог та рекомендацій щодо добору ЗІЗ та ЗО.

Залежно від видів і рівнів хімічного та радіонуклідного забруднення набір засобів індивідуального захисту в

комплектах може бути різний. Якість ЗІЗ та ЗО, що входять до складу комплектів, має давати змогу накопичувати та зберігати тривалий час у готовності до застосування. У цій роботі висвітлено вимоги до відповідності та рекомендації до формування вказаних комплектів ЗІЗ.

Автори застосували нові підходи до класифікації цих комплектів. За основу взято класифікацію видів радіаційно небезпечних робіт, де до першого класу належать роботи, що виконуються у найбільш небезпечних та шкідливих умовах і потребують найвищого рівня захисту. Відповідно й комплекти ЗІЗ рятувальників, що входять до першої категорії, забезпечують захист під час виконання робіт безпосередньо на аварійному об'єкті або на відстані менше ніж 50 м від осередку, де наявне хімічне, радіоактивне забруднення чи біологічне зараження або у разі забруднення чи зараження повітря, безпосереднього контакту з твердою або рідкою небезпечною хімічною чи радіоактивною речовиною, або у разі впливу низьких чи високих температур, відкритого полум'я тощо. До комплектів другої та третьої категорій висуваються менш жорсткі вимоги.

Успішність проектування і виготовлення комплектів ЗІЗ та ефективність організації забезпечення рятувальників та особового складу спеціалізованих служб цивільного захисту комплектами ЗІЗ у разі загрози виникнення НС або застосування зброї масового ураження залежать від наявності нормативного документа, згідно з яким встановлюватимуться вимоги до комплектів ЗІЗ. На сьогодні автори статті розробляють проєкт такого нормативного документа.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Голінько В. І., Третьякова Л. Д., Чеберячко С. І. Проектування засобів індивідуального захисту працюючих : навч. посіб. / Міністерство освіти і науки України. Національний гірничий університет. Дніпро : НГУ, 2017. 181 с.
- Говаленков С. С. Попередження надзвичайних ситуацій, обумовлених техногенним викидом в атмосферу небезпечних легких газоподібних хімічних речовин : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Держ. служба України з надзвичайн. ситуацій, Нац. ун-т цивіл. захисту України. Харків, 2020. 24 с.
- Третьякова Л. Д. Розвиток наукових основ створення захисного одягу для працівників атомних електричних станцій : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. / Нац. техн. ун-т України «Київський політехнічний інститут». Київ, 2013. 37 с.
- Юрченко В., Соколовський О. Питання виробництва сучасних засобів індивідуального захисту населення та формування цивільного захисту. *Науковий вісник : цивільний захист та пожежна безпека*. 2022. № 1(13). С. 47–54.

5. Чеберячко С., Чеберячко Ю., Дерюгін О., Книш І., Пищикова О. Удосконалення клапанних систем фільтрувальних респіраторів. *Гірничий вісник : наук.-техн. зб.* Кривий Ріг, 2021. Вип. 109. С. 25–30.
6. Ковалишин В. В., Луц В. І., Пархоменко Р. В. Основи підготовки газодимозахисника : навч. посіб. Львів : ЛДУБЖД, 2015. С. 8. 380 с.
7. Чеберячко Ю. І. Розвиток теорії конструювання та вдосконалення процесів індивідуального підбору і використання протипилових респіраторів : дис. ... д-ра техн. наук : 05.26.01 / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка». Дніпро, 2019. С. 302–305. 396 с.
8. Аварійно-рятувальні та інші невідкладні роботи з ліквідації наслідків радіаційних аварій : довідник рятувальника / Калиненко Л. В. та ін. Київ, УкрНДІЦЗ, 2013. 186 с. URL : https://www.google.com/url?sa=t&trct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewj6gaui6daBAxVuh_0HNTCOCyAQFn (дата звернення : 21.09.2023).
9. Wang Lili, XIE Jianbing, Shi Zujian, Liu Xiaoyong. The personal protection of emergency rescuers in dangerous chemical accidents. Jiangsu Academy of Safety Science & Technology. Nanjing 210042, China, 2012. P. 755–762.
10. М. Довгановський. Хімічна безпека : Довідник рятувальника / ОБСЄ. Київ : Ваїте, 2018, 135 с. URL : <https://www.osce.org/uk/project-coordinator-in-ukraine/375937> (дата звернення : 22.09.2023).
11. Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України : наказ МОЗ України від 02.02.2005 р. № 54. Київ, 2005. 67 с.
12. Одяг захисний. Загальні вимоги : ДСТУ EN ISO 13688 : 2016 (EN ISO 13688:2013, IDT; ISO 13688:2013, IDT) [Чинний від 2017.10.01]. Київ : УкрНДНЦ, 2016. 22 с.
13. Система стандартів безпеки праці. Засоби індивідуального захисту. Загальні вимоги та класифікація : ДСТУ 7239:2011 [Чинний від 2011.02.02]. Київ : УкрНДНЦ, 2011. 11 с.
14. Безпека у надзвичайних ситуаціях. Комплекти засобів індивідуального захисту рятувальників Класифікація й загальні вимоги : СОУ МНС 75.2-00013528-005:2011 [Чинний від 2011.12.30]. Київ : МНС України, 2011. 8 с.
15. Безпека у надзвичайних ситуаціях. Режим діяльності рятувальників, що використовують засоби індивідуального захисту під час ліквідування наслідків аварій на хімічно та радіаційно-небезпечних об'єктах. Загальні вимоги : СОУ МНС 75.2-00013528-006:2011 [Чинний від 2011.12.30]. Київ : МНС України, 2011. 12 с.
16. Про затвердження Порядку організації службової підготовки осіб рядового і начальницького складу служби цивільного захисту : наказ МВС України від 15.06.2017 № 511, зареєстрований в Мінюсті України 10.07.2017 р. за № 835/30703. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0835-17#Text> (дата звернення : 21.09.2023).

REFERENCES

- 1 Holinko, V., Tretiakova, L., & Cheberiyachko, S. (2017) *Proektuvannia zasobiv indyvidualnogo zahystu pratsiuvnykh* [Designing personal protective equipment for workers]: navch. posib. Ministerstvo osvity i nauky Ukrainy. Natsionalnyi hirnyy hyi universytet/ Dnipro: NHU [in Ukrainian].
- 2 Hovalenkov, S. (2020) *Poperedzhennia nadzvychainykh sytuatsii, obumovlenykh tekhnohennym vykydom v atmosferu nebezpechnykh legkykh gazopodibnykh khimichnykh rehovyn* [Prevention of emergency situations caused by man-made emission of dangerous light gaseous chemical substances into the atmosphere]. (Extended abstract of candidate's thesis). State Service of Ukraine for Emergency Situations, National University of Civil Protection of Ukraine. Kharkiv [in Ukrainian].
- 3 Tretiakova, L. (2013) *Rozvytok naukovykh osnov stvorennia zakhysnoho odiahy dlia pratsivnykh atomnykh elkrtrychnykh stantsii* [Development of the scientific basis for the creation of protective clothing for employees of nuclear power plants]. (Extended abstract of Doctor's thesis). National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»: Kyiv [in Ukrainian].
- 4 Yurchenko, S., & Sokolovskii, O. (2022) *Pytannia vyrobnytstva suchasnykh zasobiv indyvidualnogo zahystu naselennia ta formuvan tsyvilnogo zakhystu* [The question of the production of modern means of individual protection of the population and the formation of civil protection]. Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zahyst ta pozhezhna bezprka. Tom 1. № 13 doi: 47–54 [in Ukrainian].
- 5 Cheberiyachko, S., Cheberiyachko, Y., Deriuhin, O., Knysh, I., & Pyschchykova, O. (2021) *Udoskonalnnaia klapannykh system filtruvalnykh respiratoriv* [Improvement of valve systems of filter respirators]. Hirnychi visnyk, 109. doi: 25–30 [in Ukrainian].
- 6 Kovalyshyn, V., Lushch, V., & Parkhomenko, R. (2015) *Osnovy pidhotovky hazodymozakhysnyka: navch. posib* [Basics of gas and smoke protection training: a study guide] Lviv: LDUBZHD [in Ukrainian].
- 7 Cheberiyachko, Y. (2019) *Rozvytok teorii konstruiuvannia ta vdoskonalennia protsesiv indyvidualnogo pidboru s vykorystannia protytypovykh respiratoriv* [Development of the theory of design and improvement of processes of individual selection and use of antipyl respirators]: (Extended abstract of Doctor's thesis) / National Technical University of Ukraine «Dnipro Polytechnic». Dnipro [in Ukrainian].
- 8 Kalynenko, L., (2013) *Avariino-riatuvalni ta inshi nevidkladni roboty z likvidatsii naslidkiv radiatsiinykh avarii: dovidnyk riatuvalnyka* [Emergency and other urgent work on elimination of the consequences of radiation accidents: Rescuer Handbook] Kyiv: in Yure. Retrieved from <https://www.google.com/url?sa=t&trct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewj6gaui6daBAx> [in Ukrainian].
- 9 Wang, Lili, XIE, Jianbing, Shi, Zujian, Liu, Xiaoyong. The personal protection of emergency rescuers in dangerous chemical accidents. Jiangsu Academy of Safety Science & Technology. Nanjing 210042, China, 2012. P. 755–762.
- 10 Dovhanovskyi, M. (2018) *Khimichna bezpeka: dovidnyk riatuvalnyka* [Chemical Safety: Rescuer Handbook] Kyiv: Vaite. [in Ukrainian].
- 11 *Osnovni sanitarni pravyla zabezpechennia radiatsiinoi bezpeky Ukrainy* [Basic sanitary rules for ensuring radiation safety of Ukraine] (2005) from 2 February 2005. Kyiv: The Ministry of Health of Ukraine [in Ukrainian].
- 12 *Odiah zakhysnyi. Zahalni vymohy* [Clothes protective. general requirements] (2016) DSTU EN ISO 13688:2016 (EN ISO 13688:2013, IDT; ISO 13688:2013, IDT) from 1st October 2017. Kyiv: UkrNDC. [in Ukrainian].
- 13 *Systema standartiv bezpeky pratsi. Zasoby indyvidualnogo zahystu. Zahalni vymohy ta kvalifikatsiia* [Occupational safety system. Personal protective equipment. General requirements and classification]. (2011). DSTU 7239:2011 from from 2 February 2011.02.02. Kyiv: UkrNDC. [in Ukrainian].
- 14 *Bezpeka u nadzvychainykh sytuatsiakh. Komplekty zasobiv indyvidualnogo zahystu riatuvalnykh Klasyfikatsiia ta zahalni vymohy* [Safety in emergency situations. Sets of personal protective equipment for rescuers Classification and general requirements]. (2011). SOU of the Ministry of Emergency Situations 75.2-00013528-005:2011. Kyiv: MES Ukrainy. [in Ukrainian].

- 15 *Bezpeka u nadzvychainyh sytuatsiah. Rezhym dialnosti riaturalnykh, shcho vykorystovuiyt zasoby indyvidualnogo zakhystu pid chas likviduvannia naslidkiv avarii na khimichno ta radiatsiino nebezpechnykh ob'ekтах. Zagalnyi vymogy* [Safety in emergency situations. Mode of activity of rescuers using personal protective equipment during liquidation of the consequences of accidents at chemically and radiation-hazardous facilities. general requirements s]. (2011). SOU of the Ministry of Emergency Situations 75.2-00013528-006:2011. Kyiv: MES Ukrainy. [in Ukrainian].
- 16 Order of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine On the approval of the Procedure for the Organization of Service Training of Private and Executive Staff of the Civil Protection Service from June 15 2017, № 511. (2017. July 10). Ministry of Internal Affairs of Ukraine. [in Ukrainian].

REQUIREMENTS FOR THE EQUIPMENT OF RESCUERS DURING PERFORMANCE OF EMERGENCY – RESCUE WORK IN THE MIDDLE OF AN EMERGENCY SITUATION WITH SPILL (RELEASE) OF RADIOACTIVE AND DANGEROUS CHEMICAL SUBSTANCES

L. Kalynenko, M. Andriyenko, O. Slutska

Institute of Public Administration and Research in Civil Protection, Ukraine

KEYWORDS: ANNOTATION

enter of an emergency situation with a spill (emission) of radioactive, dangerous chemical substances and biological pathogenic agents, the use of weapons of mass destruction, requirements for the protection of rescuers, sets of personal protective equipment.	Currently, Ukraine is in a situation that requires the presence of a highly effective system of protection against RHC contamination (contamination) not only in the Armed Forces, but also in the State Emergency Service of Ukraine. The technical compliance of modern PPE must effectively resist possible threats not only during an emergency, but also under the conditions of the use of WMD, during operations in the regions of the Russian Federation, contamination or contamination due to terrorist actions and the destruction of nuclear power and chemical industry enterprises. In this regard, equipping rescuers with personal protective equipment (hereinafter referred to as PPE) becomes important. In the article, the authors showed that providing the personnel of emergency and rescue formations with PPE during operations in areas of radioactive, chemical contamination or biological contamination, their timely and skillful use is no less important than the correct organization of work taking into account protection «time and distance». that is, the ability to clearly and coherently and with the use of manipulators and the necessary auxiliary equipment, quickly perform the necessary work in the emergency room in order to reduce possible radiation doses or contamination levels. Along with this, it is very important that PPE have the necessary technical characteristics to protect both respiratory organs, skin and eyes. Currently, there are quite a lot of such tools in Ukraine, but they must meet a number of requirements that the authors described in the article. PPE sets are currently the most effective equipment used by rescuers of emergency rescue services and formations during emergency rescue operations in areas with different concentrations of radioactive substances, dangerous chemical, biological, combat poisons, and combustion products. The authors present the classification of such kits, their composition and recommendations for assembly. Organizations and enterprises that design and manufacture PPE kits, as well as executive power organizations, local government organizations, other public organizations, organizations and enterprises of all forms of ownership that ensure the implementation of state policy in the field of civil protection, organize the provision of rescuers and specialized personnel services with these sets and in the event of a threat of HC or in the case of the use of weapons of mass destruction, a normative document is required that sets the requirements for PPE sets.
---	---

УДК 614.8.028

ВИКОРИСТАННЯ CFD-МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПОШИРЕННЯ НЕБЕЗПЕЧНИХ ХІМІЧНИХ РЕЧОВИН

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2.173-179>

Огурцов С. Ю., ORCID iD 0000-0003-3224-9436

E-mail: kafedracz@ukr.net

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції:

11.04.2023

Пройшла рецензування:

02.05.2023

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

небезпечна хімічна речовина, зона хімічного забруднення, глибина поширення вторинної хмари, хлор, ALOHA, FDS.

АНОТАЦІЯ

Стаття присвячена оцінці можливості застосування програмного забезпечення, призначеного для моделювання пожеж Fire Dynamic Simulator (далі – FDS), з метою моделювання та надання оцінки поширенню небезпечних хімічних речовин у просторі у разі розрахункової аварії. Розглянуто варіант розрахункової аварії, пов'язаної з виливом рідкого хлору та його подальшим випаровуванням з поверхні розливу. Отримані дані порівняно з результатами розрахунку, виконаного за допомогою програмного забезпечення «ALOHA». Визначено, що програмне забезпечення FDS може бути застосовано для CFD-моделювання газового середовища у разі невеликих аварій з викидом / виливом небезпечних хімічних речовин через моделювання частини простору у декілька кілометрів. Однак необхідно використовувати додаткові алгоритми щодо визначення інтенсивності викиду небезпечних хімічних речовин, наприклад у разі їх випаровування, що не можуть бути безпосередньо реалізовані засобами FDS. Результати максимальних значень концентрації небезпечної хімічної речовини у просторі, отримані за допомогою FDS, значно відрізняються від даних, отриманих за допомогою програмного забезпечення ALOHA. Співвідношення розрахункових концентрацій НХР досягає 1300% із збільшенням відстані від джерела випаровування. Розсіювання хмари НХР, змодельованої за допомогою FDS, відбувається значно повільніше, ніж для хмари, розрахованої за допомогою ALOHA. Зазначене може бути пов'язано з відсутністю досвіду моделювання атмосферних процесів в FDS, необхідністю уточнення вітрових профілів, граничних умов моделі. Надалі перспективним може бути проведення досліджень щодо моделювання атмосферних процесів та порівняльного аналізу між розрахунковими значеннями параметрів поширення небезпечних хімічних речовин, отриманих із використанням CFD-моделювання, та даними за результатом прямих вимірювань під час експериментальних досліджень.

Постановка проблеми. Нині в Україні для оцінки можливої хімічної обстановки та прогнозування масштабів забруднення в разі виникнення аварійних ситуацій, пов'язаних із поширенням в атмосфері небезпечних хімічних речовин (далі – НХР) використовується «Методика прогнозування наслідків виливу (викиду) небезпечних хімічних речовин під час аварій на хімічно небезпечних об'єктах і транспорті» [1], яка замінила попередню методику [2], що своєю чергою стала

чинною з 2001 року. Загальною ознакою цих двох методик [1–2] є застосування підходу, що передбачає використання попередньо розрахованих таблиць, які ув'язують вид небезпечної хімічної речовини (далі – НХР), її масу (яка потрапляє у навколишнє середовище), швидкість вітру та ступінь вертикальної стійкості атмосфери. Потім за допомогою застосування коефіцієнтів, враховуючих співвідношення мас НХР до наведених в таблиці, типу рельєфу місцевості

визначаються глибини поширення первинної та/або вторинної хмари НХР. Необхідно зауважити, що оновлена Методика [1], окрім табличних даних, містить, зокрема й формули, за якими можливо провести розрахунок зазначених вище глибин поширення НХР. Такі формули базуються на найбільш простих залежностях теплофізики та емпіричних залежностях, що дає змогу оцінити розподіл маси НХР між первинною та вторинною хмарами, а також виконати розрахунок швидкості випаровування НХР з поверхні розливу.

Порівнюючи Методику [1] із розрахунковими методами з допомогою таких програмних засобів, як «ALOHA», «PHAST KORA» стає зрозумілим, що такий спрощений підхід не враховує значну кількість факторів, які принципово впливають на результати розрахунку, серед яких: тип витoku (розлив, трубопровід, форма резервуара, розмір отвору пошкодження тощо). Крім того, наведені моделі розрахунку не враховують особливостей рельєфу місцевості, крім загальних коефіцієнтів.

Використання табличного методу дає змогу отримати результат, хоча і відносно наближений, у досить короткий проміжок часу, що є дуже важливим у разі аварійного прогнозування безпосередньо на місці події. Але на сьогодні обчислювальні засоби дають можливість проводити розрахунок у відносно невеликий час, а у разі довгострокового прогнозування час виконання розрахунку взагалі відходить на другорядну позицію.

Отже, цікавим та перспективним є оцінка можливості застосування програмного забезпечення, призначеного для проведення CFD-моделювання газового середовища, що дає змогу визначати концентрації його складових безпосередньо в кожній точці простору, який моделюється. Крім того, такі програмні засоби допомагають змодельовати як 3D рельєф місцевості, так і розташування будівель та споруд, що потрапляють у зону хімічного ураження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Робота [3] дослідників із США була присвячена порівняльному аналізу 14 моделей розрахунку зон хімічного забруднення, а саме – «ADAM», «AFTOX», «ALOHA», «Briter and McQuaid», «DEGADIS», «HEGADAS», «OB/DG i SLAB», «CHARM», «EACHAP», «PHAST», «SAFETI», «TRACE i WHAZAN». Отримані прогнози максимальних концентрацій мали середні похибки +/- 30% або менше.

Порівняльному аналізу результатів розрахунку меж зон хімічного забруднення із використанням програмних засобів «ALOHA», «PHAST KORA» присвячена стаття південнокорейських авторів Lee H., Sohn J. [4]. У статті розглянуто питання розрахунку глибини поширення 5 різних НХР у разі аварії у різні пори року. За даними авторів, результати розрахунків відрізнялись до 1400% залежно від пори року та виду НХР. Визначено, що для аварій, пов'язаних з азотною кислотою та аміаком, найкращим вибором була ALOHA, тоді як KORA була більш точною для аварій, пов'язаних із хлористим воднем і сірчаною кислотою, а PHAST – для аварій, пов'язаних із формальдегідом.

У технічному звіті [5] підсумовуються результати оцінювання модуля «ADAM», розробленого Спільним дослідницьким центром ЄС. Оцінювання проведено за серією відповідних сценаріїв через порівняння результатів ADAM з результатами, отриманими за допомогою аналогічних програмних засобів, і з експериментальними даними, отриманими в серії польових досліджень. Порівняння проведено за багатьма варіантами аварій із використанням різноманітних фізичних моделей (устаткування зі стисненими газами, трубопроводи, розлив НХР, пожежі розливів та струменів, вибух парів речовин тощо).

Формулювання цілей дослідження. За мету дослідження ставилось визначення можливості застосування програмного забезпечення Fire Dynamic Simulator [6] для проведення моделювання поширення НХР у просторі

під час розрахункової аварії та порівняння отриманих значень із розрахованими за допомогою програмного забезпечення для оцінки ризиків аварій, що супроводжуються викидом НХР ALOHA® (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) [7], яке розроблено агентством захисту навколишнього середовища (EPA) США.

Для досягнення зазначеного поставлено такі завдання:

- розробити сценарій умовної аварії, що може бути змодельований за допомогою FDS та ALOHA;
- провести моделювання та розрахунок сценарію;
- проаналізувати отримані дані концентрацій НХР.

Методи дослідження. В межах цієї роботи для оцінки параметрів поширення небезпечних хімічних речовин, а саме: значень концентрації НХР на різних відстанях, візуалізації концентрації на площах поперечних перетинів використано програмне забезпечення «Fire Dynamics Simulator» [6], яке призначене насамперед для моделювання процесів тепломасоперенесення в умовах пожежі, але й здатне визначати розподіл концентрацій газових речовин у повітрі, за умови їх надходження у модель із заданими користувачем витратами. FDS реалізує обчислювальну гідродинамічну модель (CFD) тепломасоперенесення у разі горіння на основі польового методу моделювання. FDS чисельно вирішує рівняння Нав'є-Стокса для низькошвидкісних температурно-залежних потоків. Водночас особлива увага приділяється поширенню диму і теплопередачі під час пожежі. Модель являє собою систему рівнянь у частинних похідних, що містить рівняння збереження маси, моменту та енергії і вирішується на тривимірній постійній сітці.

Для порівняння отриманих за допомогою FDS даних розподілу концентрації НХР в часі та просторі, а також для визначення параметрів випаровування НХР використано програмне забезпечення «ALOHA».

Виклад основного матеріалу.

Для проведення обчислювальних експериментів вибрано таку НХР, як хлор (Cl_2). Обрання такої речовини визначалось її поширенням у технологічних процесах, зокрема на водоочисних станціях для знезараження питної води, простій молекулярній будові та відомих даних про її токсичний вплив. Крім того, у газоподібному стані хлор є важчим за повітря, тобто хмара НХР буде перебувати у приземному шарі атмосфери. Це дає змогу обмежити вертикальну складову простору, що моделюється.

Враховуючи, що FDS не здатний моделювати високошвидкісні потоки, що супроводжують вибух та руйнування обладнання, яке перебуває під тиском, у межах цієї роботи розглядався варіант аварії, пов'язаний із розливом рідкого, охолодженого до -35°C хлору на ґрунт та його подальше кипіння та випаровування. В цьому разі можемо розглядати поширення лише вторинної хмари НХР.

Маса розлитої НХР становить 10 кг, площа розливу 1 м^2 .

Стан атмосфери – інверсія, температура повітря 20°C . ALOHA враховує в розрахунку географічні координати місця аварії, час доби, розраховуючи кут нахилу сонячних променів та їх вплив на нагрів земної поверхні та відповідно на стан стабільності атмосферного повітря. З огляду на це час події визначаємо як 00 год 00 хв, 22 червня. Вітер зі швидкістю 1 м/с . Напрямок вітру 270° .

Вихідні параметри місця, речовини, атмосферних умов та джерела НХР для ALOHA визначені нижче.

SITE DATA:

Location: VISTA, CALIFORNIA

Building Air Exchanges Per Hour: 0.13 (unsheltered double storied)

Time: June 22, 2023 0000 hours PDT (user specified)

CHEMICAL DATA:

Chemical Name: CHLORINE

CAS Number: 7782-50-5 Molecular Weight: 70.91 g/mol

AEGL-1 (60 min): 0.5 ppm AEGL-2 (60 min): 2 ppm AEGL-3 (60 min): 20 ppm

IDLH: 10 ppm

Ambient Boiling Point: -34.3°C

Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm

Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%

ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)

Wind: 1 meters/second from 270° true at 3 meters

Ground Roughness: open country Cloud Cover: 0 tenths
Air Temperature: 20° C Stability Class: F
Inversion Height: 10 meters Relative Humidity: 50%

SOURCE STRENGTH:

Evaporating Puddle
Puddle Area: 1 square meters Puddle Mass: 10 kilograms
Ground Type: Default soil Ground Temperature: 20° C
Initial Puddle Temperature: -35° C
Release Duration: 3 minutes
Max Average Sustained Release Rate: 6.14 kilograms/min
(averaged over a minute or more)
Total Amount Released: 10.00 kilograms

Після введення вихідних даних в ALOHA є можливість визначити зміну масової швидкості випаровування НХР з ґрунту в часі, яка наведена на рис. 1.

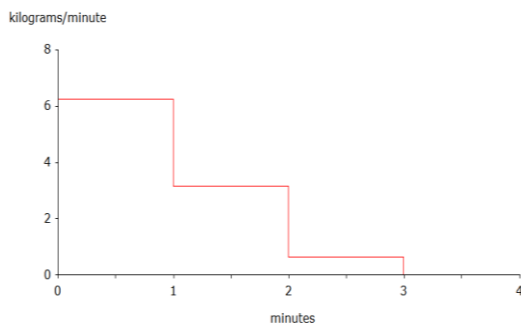


Рисунок 1– Зміна масової швидкості випаровування Cl_2 з поверхні розливу у часі, визначена за допомогою ALOHA

Моделювання випаровування розливу хлору із використанням програмного

забезпечення «FDS» проводилось з огляду на дані, наведені на рис. 1.

Емісія Cl_2 в атмосферу розглядалась як уприскування газу через горизонтальну площину з такими характеристика опису поверхні SURF:

```
&SURF ID='My source',
  RGB=26,204,26,
  PROFILE='ATMOSPHERIC',
  MASS_FLUX=0.167,
  SPEC_ID='CHLORINE',
  RAMP_MF='My source_RAMP_MF'/
&RAMP ID='My source_RAMP_MF', T=0.0, F=0.614/
&RAMP ID='My source_RAMP_MF', T=59.0, F=0.614/
&RAMP ID='My source_RAMP_MF', T=60.0, F=0.31/
&RAMP ID='My source_RAMP_MF', T=119.0, F=0.31/
&RAMP ID='My source_RAMP_MF', T=120.0, F=0.065/
&RAMP ID='My source_RAMP_MF', T=180.0, F=0.065/
&RAMP ID='My source_RAMP_MF', T=181.0, F=0.0/
```

Розміри обчислювальної сітки складали 1400 м × 600 м × 10 м, розмір чарунок становив 0,5 м для сітки в зоні поверхні емісії та 1 м – для інших зон. Загальна кількість чарунок обчислювальної сітки становила 17 151 000 од. Вітер у розрахунковій зоні задавався за допомогою вбудованої FDS-функції &WIND.

Вимірювання концентрації НХР проводилась за допомогою точкових вимірювачів, розташованих у моделі на відстані 1 м від нижньої межі сітки (рівня ґрунту) (рис. 2).

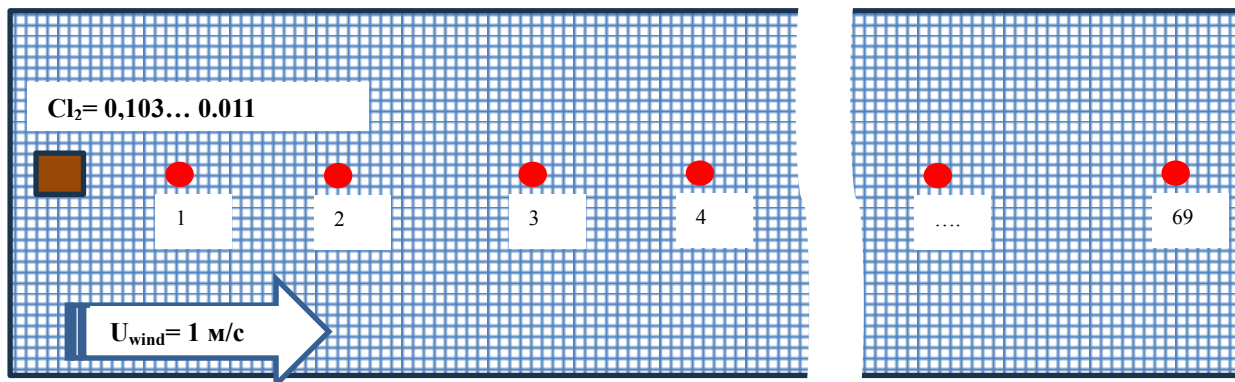


Рисунок 2– Розташування точкових вимірювачів концентрації Cl_2 у внутрішньому об'ємі моделі

Перший вимірювач розташовувався у 15 м від краю поверхні розливу, наступні – через кожні 20 м. Розташування точкових вимірювачів збіглося з віссю напрямку вітру (270 °). Загальна кількість таких

вимірювачів становила 69 од. Моделювання проводилось протягом 2700 с.

Процес розрахунку моделі, що містить обчислювальну сітку таких розмірів, потребував більше 44 ГБ оперативної пам'яті та 44 процесорні ядра (відповідно до поділу обчислювальної сітки), але водночас, враховуючи невелику швидкість газових потоків у моделі, шаг розрахунку становив близько 30 с, що дало змогу провести моделювання за час, який не перевищував 12 год.

Зовнішній вигляд слайсів розподілу концентрації Cl_2 в моделі на висоті 1 м, що візуалізовано за допомогою програмного забезпечення «Pyrosim Results», наведено на рис. 3. Pyrosim Results використано внаслідок того, що в ньому на відміну від Smokeview є можливість легко встановлювати вручну верхні та нижні діапазони візуалізації значень фізичних величин.

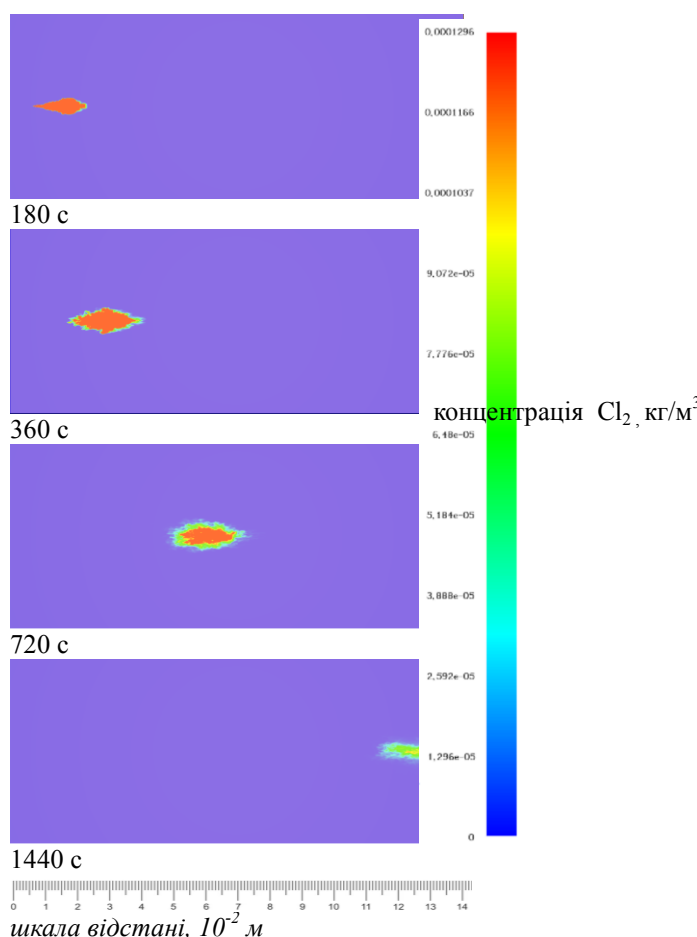


Рисунок 3 – Візуалізація руху хмари Cl_2 з концентрацією $PC_{t50}=129,6$ мг/м³ у внутрішньому об'ємі моделі

З огляду на дані, наведені на рис. 3, концентрація Cl_2 , що відповідає

граничному значенню токсодози $PC_{t50}=129,6$ мг/м³ зберігається до відстані 1100 м, але у досить невеликій порівняно із розмірами хмари НХР зоні.

Зона концентрації Cl_2 визначена та візуалізована за допомогою ALOHA, що наведено на рис. 4.

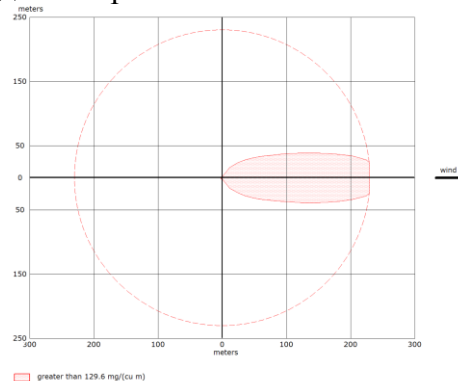


Рисунок 4 – Візуалізація поширення хмари Cl_2 з концентрацією $PC_{t50}=129,6$ мг/м³ за допомогою ALOHA

З огляду на дані рис. 4 зона, в якій концентрація Cl_2 буде 129,6 мг/м³ уздовж осі напрямку вітру, становить 229 м.

Для більш точного порівняння значення концентрацій Cl_2 на різних відстанях від джерела випаровування визначимо максимальні значення концентрації НХР за допомогою ALOHA на відстанях, що відповідають розташуванню точкових вимірювачів у моделі рис. 2. Наведені на рис. 5 значення відповідають максимальним значенням отриманих концентрацій Cl_2 на різних відстанях від джерела випаровування. Вони були отримані за допомогою аналізу у табличному процесорі «Microsoft Excel 2019» масивів значень точкових вимірювачів FDS та розрахунку зміни концентрації НХР у конкретній точці за допомогою функції Display / Threat At Point ALOHA.

Отримані значення свідчать про значну розбіжність максимального значення концентрацій НХР на різних відстанях від джерела випаровування, отриманих за допомогою FDS та ALOHA. Різниця між значеннями досягає 1300% та збільшується зі збільшенням відстані від джерела НХР. Хмара НХР, зважаючи на отримані значення точкових вимірювачів

FDS та даних слайсів на рис. 3, залишається більш стабільною та розсіюється значно повільніше, ніж це передбачає ALOHA. Це можна пояснити браком досвіду моделювання атмосферних

процесів у FDS, необхідністю уточнення механізмів вітрових профілів, що вбудовані у програмне забезпечення, граничних умов моделі.

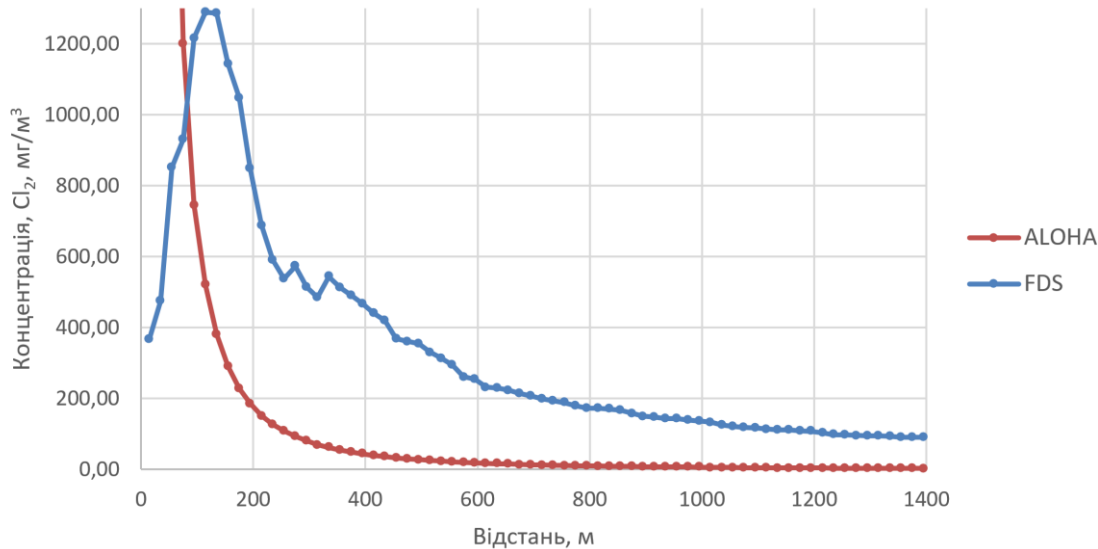


Рисунок 5 – Максимальні значення концентрацій у хмарі Cl_2 , визначені за допомогою FDS та ALOHA

Висновки та напрями подальших досліджень. Внаслідок проведених розрахунків поширення НХР у разі розливу рідкого хлору на поверхню ґрунту, проведеного за допомогою двох програмних засобів розрахунку FDS та ALOHA, можна зробити такі висновки.

1. Програмне забезпечення «Fire Dynamic Simulator», призначене для моделювання пожеж, може бути застосовано також для CFD-моделювання газового середовища у разі невеликих аварій з викидом / виливом небезпечних хімічних речовин через моделювання частини простору на декілька кілометрів. Однак необхідно використовувати додаткові алгоритми, пов'язані із визначенням інтенсивності викиду небезпечних хімічних речовин, наприклад у разі їх випаровування, що не можуть бути безпосередньо реалізовані засобами FDS.

2. Результати максимальних значень концентрації небезпечної хімічної речовини у просторі, отримані за

допомогою FDS, значно відрізняються від даних, отриманих за допомогою програмного забезпечення «ALOHA». Співвідношення розрахункових концентрацій НХР досягає 1300% із збільшенням відстані від джерела випаровування. Тобто розсіювання хмари НХР, змодельованої за допомогою FDS, відбувається значно повільніше, ніж для хмари, розрахованої за допомогою ALOHA. Це може бути пов'язано із браком досвіду моделювання атмосферних процесів у FDS, необхідністю уточнення вітрових профілів, граничних умов моделі.

3. Надалі перспективним може бути проведення досліджень, спрямованих на моделювання атмосферних процесів та порівняльний аналіз між розрахунковими значеннями параметрів поширення небезпечних хімічних речовин, які отримано із використанням CFD-моделювання та даними, отриманими за результатом прямих вимірювань під час експериментальних досліджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Методика прогнозування наслідків вилу (викиду) небезпечних хімічних речовин під час аварій на хімічно небезпечних об'єктах і транспорті / Офіційний вебпортал ВРУ. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0440-20#Text> (дата звернення : 13.10.2023).
2. Про затвердження Методики прогнозування наслідків вилу (викиду) небезпечних хімічних речовин при аваріях на промислових об'єктах і транспорті / Офіційний вебпортал ВРУ. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0326-01#Text> (дата звернення : 13.10.2023).
3. Hanna S. R., Strimaitis D. G., Chang J. C. Evaluation of fourteen hazardous gas models with ammonia and hydrogen fluoride field data. *J Hazard Mater.* 1991. Vol. 26. № 2. P. 127–158.
4. Lee H. E. et al. Alternative risk assessment for dangerous chemicals in South Korea regulation : Comparing three modeling programs. *Int J Environ Res Public Health.* 2018. Vol. 15. № 8.
5. Fabbri L., Wood M. H. Accident Damage Analysis Module (ADAM) : Novel European Commission tool for consequence assessment – Scientific evaluation of performance. *Process Safety and Environmental Protection.* 2019. Vol. 129.
6. McGrattan K. B. Fire dynamics simulator (version 6) : Technical Reference Guide. Vol. 1. Mathematical Model. Gaithersburg, MD, 2023.
7. Oceanic N., Administration A., of Response O. ALOHA® (Areal Locations Of Hazardous Atmospheres) 5.4.4 : Technical Documentation. 2013.

REFERENCES

1. Metodika prognozuvannya naslidkiv vilivu (vikidu) nebezpechnih himichnih rechovin pid chas avarij na himichno nebezpechnih ob'ektah i transporti [Methodology for forecasting the consequences of the spill (emission) of hazardous chemicals during accidents at chemically hazardous facilities and transport]. Retrived from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0440-20#Text>. [in Ukrainian].
2. Pro zatverdzhennya Metodiki prognozuvannya naslidkiv vilivu (vikidu) nebezpechnih himichnih rechovin pri avariayah na promisloviy ob'ektah i transporti [On the approval of the Methodology for forecasting the consequences of the spill (emission) of hazardous chemical substances during accidents at industrial facilities and transport]. Retrived from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0326-01#Text>. [in Ukrainian].
3. Hanna, S. R., Strimaitis, D. G., Chang, J. C. Evaluation of fourteen hazardous gas models with ammonia and hydrogen fluoride field data. *J Hazard Mater.* 1991. Vol. 26. № 2. P. 127–158.
4. Lee, H. E. et al. Alternative risk assessment for dangerous chemicals in South Korea regulation: Comparing three modeling programs // *Int J Environ Res Public Health.* 2018. Vol. 15, № 8.
5. Fabbri, L., Wood, M. H. Accident Damage Analysis Module (ADAM): Novel European Commission tool for consequence assessment – Scientific evaluation of performance. *Process Safety and Environmental Protection.* 2019. Vol. 129.
6. McGrattan, K. B. Fire dynamics simulator (version 6): Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model. Gaithersburg, MD, 2023.
7. Oceanic N., Administration A., of Response O. ALOHA® (Areal Locations Of Hazardous Atmospheres) 5.4.4: Technical Documentation. 2013.

USE OF CFD-MODELING FOR ESTIMATION OF DISTRIBUTION PARAMETERS OF CHEMICAL SUBSTANCES

Ohurtsov S.

Institute of Public Administration and Research in Civil Protection, Ukraine

KEYWORDS: ANNOTATION

hazardous
chemical,
chemical
contamination
zone, secondary
cloud depth,
chlorine, ALOHA,
FDS.

In this article we assess the possibility of the Fire Dynamic Simulator (FDS), software designed for simulating fires, usage in order to simulate and evaluate the processes of the spread of hazardous chemicals in the air in the case of a calculated accident at a chemically hazardous facility. We have considered and calculated an accident related to the spill of liquid chlorine with a temperature below the boiling point on the soil and its subsequent evaporation from the surface of the spill. The obtained data were compared with the results of the calculation of such an accident performed using the ALOHA software. It has been proved that FDS software can be used for CFD modeling of gas environments in the case of small accidents involving the release / spill of hazardous chemicals by modeling a section of surface several kilometers long. Such calculations will require a significant amount of RAM of the computing equipment, at the same time, they will impose strict requirements on the performance of the central processing unit compared to the performance of tasks related to fire simulation. However, it is necessary to use additional algorithms related to determining the intensity of emission of hazardous chemicals, for example in the case of their evaporation, which cannot be directly implemented by means of FDS. The results of the maximum values of the concentration of a hazardous chemical substance in the air obtained with the help of FDS are significantly different from the data obtained with the help of the ALOHA software. The ratio of calculated concentrations of NKR reaches 1300% with increasing distance from the source of evaporation. The dispersion of the NCR cloud simulated using FDS is much slower than that of the cloud calculated using ALOHA, which may be due to the lack of experience in modeling atmospheric processes in FDS, the need to refine wind profiles, and model boundary conditions. In the future, it may be promising to carry out research aimed at modeling atmospheric processes and a comparative analysis between the calculated values of the parameters of the distribution of hazardous chemicals obtained using CFD-modeling and the data obtained as a result of direct measurements during experimental studies.

Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека

науковий журнал
ISSN 2518-1777

Підписано до друку 01.12.2023
Формат 60х90/8
Обл. вид. арк. —
Друк цифровий. Замовлення №____
Віддруковано згідно з наданим оригінал-макетом
ТОВ «Про формат»
Україна, 04080, м. Київ, вул. Кирилівська, 86
Реєстраційне свідоцтво ДК № 5942 від 11 січня 2018 р.
Тир. 50 прим.