НАУКОВИЙ ВІСНИК: Цивільний захист та пожежна безпека

№ 1 (19), 2025

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

ISSN 2518-1777

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
Ідентифікатор медіа R30-02071

Журнал включено до категорії «Б» Переліку наукових фахових видань України в галузі технічних наук за спеціальностями:
261 «Пожежна безпека»
263 «Цивільний захист»
Наказ Міністерства освіти і науки України від 02.07.2020 № 886
У разі передруковування матеріалів письмовий дозвіл ІДУ НД ЦЗ є обов'язковим
Рекомендовано до видання рішенням Науково-технічної ради ІНД ЦЗ НУЦЗ України

Протокол від 25.06.2025 № 5

Ідентифікатор випуску DOI:
https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.1

Підписано до друку 25.06.2025

Формат 60 × 84/8
Наклад 50 прим.

Редакційна колегія:

головний редактор – голова редколегії
д-р техн. наук ***Пономаренко Р. В.***
заступник головного редактора
д-р техн. наук ***Поздєєв С. В.***
відповідальний секретар
канд. техн. наук ***Огурцов С. Ю.***

д-р техн. наук ***Тютюник В. В.***
д-р техн. наук ***Пруський А. В.***
д-р техн. наук ***Цапко Ю. В.***
д-р техн. наук ***Ніжник В. В.***
д-р техн. наук ***Єременко С. А.***
д-р техн. наук ***Жартовський С. В.***
д-р техн. наук ***Чумаченко С. М.***
д-р техн. наук ***Яковчук Р. С.***
д-р техн. наук ***Лавренюк О. І.***
д-р техн. наук ***Нуянзін О. М.***
канд. техн. наук ***Коваленко В. В.***
канд. техн. наук ***Лоїк В. Б.***
канд. техн. наук ***Новак С. В.***
канд. техн. наук ***Пазен О. Ю.***
канд. техн. наук ***Паснак І. В.***
канд. техн. наук ***Сізіков О. О.***
канд. хім. наук ***Ліхньовський Р. В.***
PhDEng. ***Врублевський Д.***
PhDEng. ***Самберг А.***

Літературні редактори: ***Коваль 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

ЗМІСТ

В. Нуянзін, А. Майборода, О. Даник, І. Ножко, Д. Журбинський, С. Гончар
Порівняння експериментальних та розрахункових значень теплот згорання алкілгліцидних етерів, як елемент забезпечення цивільної безпеки **4**

Ю. Фещук, А. Циганков, В. Мельник, О. Бедратюк, К. Шевченко
Методика експериментальних досліджень поширення полум'я та температурного впливу пожежі в приміщенні базової станції мобільного зв'язку **15**

В. Бенедюк, А. Борисов, М. Володченко, О. Зазимко, С. Огурцов
Оцінка ефективності фільтрів-поглиначів у системах очищення повітря захисних споруд цивільного захисту **24**

Я. Балло, Б. Ковалишин
Дослідження процесів обмеження поширення пожежі ззовні будівлі за допомогою обчислювальної газо-гідродинаміки **31**

С. Семичаєвський, В. Присяжнюк, М. Якіменко, М. Осадчук, В. Свірський, К. Бєлікова
Про визначення загально-світових підходів до класифікаційних вимог щодо пожежних та аварійно-рятувальних автомобілів **44**

С. Новак, М. Пустовий
Вплив параметрів сталевих конструкцій на співвідношення необхідної мінімальної товщини пасивних систем вогнезахисту за різними номінальними температурними режимами пожежі **53**

І. Стилик, Р. Пономаренко, А. Кодрик, А. Борисов, О. Тітенко, О. Добростан
Дослідження фізико-хімічних властивостей водних вогнегасних речовин на основі полімерів поліакрилату **65**

В-П. Пархоменко, Б. Михалічко, Р. Пархоменко
Сучасний стан використання у пожежогасінні та способи підвищення ефективності водних вогнегасних розчинів за допомогою змочувачів **79**

CONTENTS

V. Nuianzin, A. Maiboroda, O. Danyk, I. Nozhko, D. Zhurbynskyi, S. Honchar
Comparison of experimental and calculated values of combustion heat of alkyl glycide ethers as an element of ensuring civil safety **4**

Yu. Feshchuk, A. Tsyhankov, V. Melnyk, O. Bedratiuk, K. Shevchenko
Method of experimental studies of flame spread and the temperature influence of fire in the room of a mobile communication base station **15**

V. Benediuk, A. Borysov, M. Volodchenko, O. Zazymko, S. Ohurtsov
Evaluation of the efficiency of absorber filters in air purification systems of civil defense facilities **24**

Ya. Ballo, B. Kovalyshyn
Study of the processes of limiting the spread of fire from outside the building using computational gas hydrodynamics **31**

S. Semychayevsky, V. Prisyajnyuk, M. Yakimenko, M. Osadchuk, V. Svirskyi, K. Bielikova
On determining worldwide approaches to classification requirements for fire and emergency rescue vehicles **44**

S. Novak, M. Pustovyi
Influence of steel structure parameters on the ratio of the required minimum thickness of passive fire protection systems for different nominal fire temperature-time curves **53**

I. Stylyk, R. Ponomarenko, A. Kodryk, A. Borysov, O. Titenko, O. Dobrostan
Investigation of the physicochemical properties of water-based fire extinguishing agents based on polyacrylate polymers **65**

V.-P. Parkhomenko, B. Mykhalichko, R. Parkhomenko
Current state of use in fire firefighting and ways to increase the efficiency of aqueous fire extinguishing solutions using wetting agents **79**

Ю. Кравченко, В. Михайлов, С. Павлов
Нормативно-правове регулювання показників якості та методів контролю якості пожежних поясів як інструмент підвищення пожежної безпеки в Україні **89**

Yu. Kravchenko, V. Mykhailov, S. Pavlov
Regulatory and legal framework for quality indicators and quality control methods of fire belts as a tool for enhancing fire safety in Ukraine

Р. Майборода, Ю. Отрош
Удосконалення математичної моделі теплопередачі системи «залізобетонна колона–перекриття» **97**

R. Maiboroda, Yu. Otrosh
Improvement of the mathematical model of heat transfer of the "reinforced concrete column-floor" system

О. Басманов, Д. Карпова, С. Гарбуз, М. Володченко
Модель нагріву резервуара з нафтопродуктом під тепловим впливом пожежі в сусідньому резервуарі **109**

O. Basmanov, D. Karpova, S. Harbuz M. Volodchenko
Model of heating an oil tank under the thermal influence of a fire in an adjacent tank

О. Хлевной, Н. Жезло-Хлевна, О. Доценко, А. Борисова, А. Калиновський
Біомеханічні особливості руху осіб із двосторонніми протезами нижніх кінцівок під час евакуації в умовах пожежі **120**

O. Khlevnoi, N. Zhezlo-Khlevna, O. Dotsenko, A. Borysova, A. Kalynovskyi
Biomechanical characteristics of movement of persons with bilateral lower limb prostheses during evacuation in fire conditions

Р. Коваль, О. Твердохліб, С. Ємельяненко, Д. Середа, Л. Несенюк
Порівняльне дослідження міжнародних технічних вимог до пожежних кран-комплектів: сучасний стан та перспективи уніфікації **129**

R. Koval, O. Tverdokhlib, S. Yemelianenko, D. Sereda, L. Nesenyuk
Comparative study of international technical requirements for fire fighting hoses for fixed systems: current status and prospects of unification

УДК 614.84:536.7

ПОРІВНЯННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ТА РОЗРАХУНКОВИХ ЗНАЧЕНЬ ТЕПЛОТ ЗГОРАННЯ АЛКІЛГЛІЦИДНИХ ЕТЕРІВ, ЯК ЕЛЕМЕНТ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЦИВІЛЬНОЇ БЕЗПЕКИ

https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.1.(19).4-14

Нуянзін В. М.*, ORCID iD 0000-0003-4785-0814
Майборода А. О., ORCID iD 0000-0001-6108-9772
Даник О. М., ORCID iD 0009-0003-6849-3403
Журбинський Д. А., ORCID iD 0000-0002-7225-5606
Гончар С В., ORCID iD 0000-0003-4806-7012
Ножко І. О., ORCID iD 0000-0003-1554-0088
E-mail: nuyanzin@gmail.com

Національний університет цивільного захисту України, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 10.04.2054
Пройшла рецензування: 25.04.2025

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

теплота згорання, етери гліцидолу, експериментальні методи, розрахункові способи, порівняння точності методів.

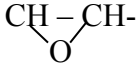
АНОТАЦІЯ

Проведено співставлення теплот згорання чотирьох етерів гліцидолу - найбільш типових представників епоксидних сполук, визначених експериментально і розрахованих методами, які застосовуються в теорії горіння. В довідниках і в літературних джерелах відомості по цих значеннях наведені лише для окремих представників і лише визначені експериментально. Між тим, починаючи з середини минулого сторіччя, епоксидні сполуки набули широкого використання в промисловості і в побуті. Маючи в своєму складі значний відсоток карбону та гідрогену всі вони відносяться до речовин горючих. До того ж, нижчі представники цього ряду достатньо летючі (температура кипіння метилгліцидолу 110^0С), що вимагає уваги до забезпечення цивільної безпеки при їх виробництві і застосуванні. Одним із найважливіших показників пожежонебезпечності речовин є теплота згорання. Останню оперативно і без значних витрат в кожному конкретному випадку можна визначити розрахунком. Але, зважаючи на наявність значної енергії напруженості в епоксидному циклі, розрахунок за відомими методами в цьому випадку супроводжується значними похибками. Для отримання надійних даних необхідно оцінити ці похибки, які в даному випадку дає кожен з методів, і визначити напрямки вдосконалення найбільш придатного з методів. Розрахунок теплоти згорання метилгліцидолу, етилгліцидолу, н-бутилгліцидолу та трет.-бутилгліцидолу проведено за формулою Д.І. Менделєєва, за методом Хандрика та за різницею енергій зв'язків між атомами у вихідних етерах гліцидолу і у продуктах їх згорання. Похибка розрахунку за кожним з методів оцінювалась порівнянням отриманих значень з дійсними величинами теплот згорання, знайденими раніше експериментальним спалюванням цих етерів у калориметричній бомбі. Виявлено, що розрахунок теплоти згорання етерів гліцидолу за формулою Д.І.Менделєєва дає результат, більший дійсного на 3,0%, розрахунок за методом Хандрика – результат, більший дійсного на 1,7%. Формальний же розрахунок за енергіями зв'язків не враховує внутрішньомолекулярного впливу атомів і груп атомів та міжмолекулярного впливу молекул, а головне, енергії напруженості в епоксидному циклі. Напруженість же в епоксидному циклі значно ослаблює і карбон-карбонові і карбон-оксигенові зв'язки. Останнє виливається в отримання результатів, значно (порядку 20%) нижчих за дійсні. За результатами дослідження рекомендовано при оцінці теплоти згорання епоксидних сполук на даний момент обирати розрахунок за методом Хандрика. Не дивлячись на емпіричність цього способу, він забезпечує достатньо прийнятні результати. В подальшому ж, для використання теоретично обґрунтованого методу розрахунку за енергіями зв'язків між атомами, необхідно встановити точне значення енергії напруженості в епоксидному циклі.

Постановка проблеми. Моноепоксидні сполуки, зокрема етери гліцидолу широко використовуються в промисловості в якості розріджувачів епоксидних смол і в якості напівпродуктів для синтезів великої кількості товарних продуктів органічної хімії. Значний вміст в молекулах цих речовин карбону (55% і більше) та гідрогену (9% і більше) і певна летючість (нижчі представники мають температуру кипіння в районі 110^0C) вимагають значної уваги до питань забезпечення цивільної безпеки при їх виробництві і використанні. Між тим, в літературних джерелах дані про показники пожежонебезпечності моноепоксидів, зокрема про їх теплоти згорання, практично відсутні. Лише в одній із знайдених робіт наведено результати експериментального визначення теплоти згорання алкілових етерів гліцидолу. Спроб же застосування для визначення цього показника розрахункових методів не зафіксовано. А саме розрахунок, на відміну від експерименту, дає можливість визначити потрібну величину оперативно, без великих витрат часу і без складного та дорогого обладнання. В епоксидних сполуках розрахунок теплоти згорання відомими методами ускладнюється наявністю в молекулах явища напруженості епоксидного циклу. На сьогоднішній день проблема придатності для розрахунку теплоти згорання епоксидних сполук кожного з відомих методів не вирішена і вимагає ретельного дослідження.

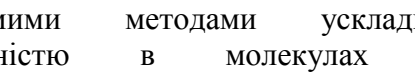
Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Синтезовані в середині минулого сторіччя сполуки з епоксидним кільцем -



швидко набули широкої популярності [1]. Найбільший їх споживач - виробництво епоксидних смол. В такому виробництві в якості затверджувача переважно застосовуються ді- та поліаміни і ді- та поліоли. В якості ж основного зшиваючого агента – виключно сполуки, які містять дві і більше епоксидні групи. На жаль, безпосередня взаємодія діепоксидів із затверджувачами дає вироби міцні, але крихкі, повністю позбавлені пластичності. Для отримання потрібного балансу між міцністю і пластичністю застосовують активні розріджувачі – етери гліцидолу різної молекулярної маси [2]. Маючи групу, аналогічну діепоксидним мономерам, ці сполуки на різних стадіях поліконденсації вбудовуються в тримірні полімерні утворення і, в залежності від своєї молекулярної маси і активності, забезпечують потрібний комплекс властивостей готового виробу.

Крім застосування в якості розріджувачів епоксидних смол, мономерні епоксиди знайшли і самостійне значення. Наявність реакційноздатного епоксидного кільця робить їх незамінними у виробництві великої кількості похідних, зокрема поліолів, целозольвів і інших пластифікаторів для полімерних сполук [3,4]. В Україні мономерні епоксиди найбільш активно досліджуються у Львівській Політехніці. Тут вперше у світовій практиці були синтезовані сполуки, які містять в одній молекулі епоксидну і пероксидну групи: 1,2—епокси-3-трет.- бутилпероксипропан



та його трет.-амілові і трет-гексилові аналоги [5]. В хімії високомолекулярних сполук епоксипероксиди забезпечують проведення прищепленої співполімеризації мономерів з подвійними зв’язками до матриць з гідроксильними групами. Зокрема, такі процеси були проведені з отриманням бісфенолових похідних [6], метакриловмісної похідної діанової смоли ЕД-22 [7], монометакрилатної похідної смоли ЕД-24 [8], карбоксилвмісних пероксидних олігомерів з епоксидними групами [9], олігомерів на основі епоксидної смоли та акрилової кислоти [10]. Дослідження епоксипероксиду в якості просочувального агенту текстильного корду для шин великовантажних автомобілів, проведені в інституті шинної промисловості (м. Дніпро), показали значне підвищення такого важливого експлуатаційного

показника як міцність на розрив [5]. Пероксидна група цих сполук вбудовується в гумову основу шини, а епоксидна – зв'язується з гідроксилами корду. Кожного року хіміки синтезують і запускають у виробництво все нові і нові сполуки такого типу і всі вони, маючи у своїй структурі значний відсоток гідрогену і карбону, здатні горіти з виділенням великої кількості теплоти. Між тим пожежонебезпечність епоксидів, зокрема достатньо летючих мономерних представників цього класу, досліджується недостатньо. В-основному увага приділяється отриманню нових типів епоксидних смол. Досліджується можливість надання їм термопластичності [11] та термостабільності [12], підвищення адгезійних властивостей [13], застосування нових отверджувачів [14] і нових модифікаторів [15], навіть модифікація електрогідравлічним ударом [16]. Увага ж на пожежонебезпечність, якщо і зверталася, то лише у випадку готових високомолекулярних виробів. Досліджувалося зниження горючості цих виробів шляхом використання гліциділсиланових [17] і фосфорних сполук [18], надання епоксидним композиціям властивостей самозатухання модифікацією їх купрум сульфатом [19] та купрум карбонатом [20], тощо. Дослідження ж показників пожежонебезпечності низькомолекулярних епоксидів лишається поза увагою дослідників, хоча саме ці сполуки значно небезпечніші, ніж їх високомолекулярні похідні.

В Національному університеті цивільного захисту України проводиться планомірне вивчення теплотехнічних характеристик епоксидних мономерів і інших похідних гліцидолу. Експериментальне визначення теплоти згорання вимагає складного обладнання, великих працевитрат і не завжди є обов'язковим. До того ж, в деяких випадках воно просто неможливе. Так, епоксиди, які містять пероксидну групу, при спробі спалювання їх у калориметричній бомбі, вибухають, не встигнувши прореагувати з киснем. В багатьох випадках можна обійтися достатньо точним розрахунком потрібного показника. Розрахункові методи визначення набагато простіші і оперативніші, ніж експериментальні. Але епоксидний цикл відрізняється помітною енергією напруженості і розрахунок відомими методами енергетичних характеристик сполук, які містять такий цикл, супроводжується значними помилками. Визначити придатність кожного з методів розрахунку для визначення потрібних показників певного класу сполук можна порівнявши результати розрахунків окремих представників цього класу з даними, отриманими для цих представників експериментально.

Формулювання цілей дослідження. Провести дослідження з оцінки точності визначення теплоти згорання сполук, які містять епоксидний цикл, прийнятими розрахунковими методами. Зробити висновок про похибки, якими супроводжується використання кожного з методів і там, де необхідно, запропонувати розробку поправок, які б збільшували достовірність отримання потрібної величини розрахунковим методом.

Виклад основного матеріалу.

На прикладі чотирьох етерів загальної формули

$CH_2 - CH - OR$, де $R = CH_3$, C_2H_5, н-C_4H_9

O

та трет.-C_4H_9,

проведено співставлення значень теплот згорання, отриманих експериментальним шляхом і розрахунком за методами, які звичайно застосовуються в теорії розвитку та припинення горіння. Абсолютно точні значення будь-якої величини дає лише ретельно виконаний експеримент. В даній роботі за точні значення теплот згорання обраних етерів гліцидолу взято дані, наведені в [21], де вони були отримані шляхом спалювання в сучасній калориметричній бомбі з ізотермічною оболонкою ретельно очищених метил-,

етил-, н-бутил- та трет.-бутилгліцидолу у кисні, звільненому від домішок.

Із розрахункових методів визначення теплоти згорання будь-якої речовини найточнішим безперечно є розрахунок за наслідком із закону Геса. За цим методом теплоту згорання речовини, яка досліджується, визначають як різницю між сумою теплот утворення продуктів реакції згорання і сумою теплот утворення вихідних речовин, тобто в даному випадку сумою теплоти утворення спалюваної речовини і теплоти утворення кисню. Остання для кисню у формі O_2 дорівнює 0. Для етерів гліцидолу теплоти утворення у довідниках відсутні, а їх значення, наведені в [21], розраховані за наслідком із закону Геса на основі експериментально визначених теплот згорання. Отже порівнювати ці величини немає ніякого сенсу. Ясно, що збіг буде стовідсотковим.

З інших методів найпростішим є розрахунок за формулою Д.І.Менделєєва [22]. В основу цієї формули Д.І. Менделєєв заклав знайдене експериментально: «несомненное» (з точністю до 1%) на той час значення теплоти згорання чистої клітковини (4190 ккал/кг), середнє значення для нафтового палива і середнє значення для жирного кам'яного вугілля (8110 ккал/кг). Значення 34500 ккал/кг для водню (гідрогену), запропоноване до того Дюлонгом, він замінив на 30000 ккал/кг. Для оксигену та нітрогену було введено величини зі знаком «-», знов-таки знайдені експериментально. Формула, яку запропонував Д.І. Менделєєв, мала вигляд:

$$Q_в = 81C + 300H – 26(O+S) \text{ ккал/кг}. \quad (1)$$

Після переведення одиниць виміру з ккал у кДж за цим методом орієнтовне значення вищої теплоти згорання речовини і донині вираховують за формулою

$$Q_в = 339,4C + 1257H - 108,9\ (O+N-S) \text{ кДж/кг, де} \quad (2)$$

C, H, O, N, S – масова відсоткова кількість у суміші відповідно карбону, гідрогену, оксигену, нітрогену та сульфуру. Перевірку методу будо проведено на статистичних даних із спалювання вуглеводнів лінійної структури та оксиген-, сульфур- і нітрогенпохідних цих вуглеводнів. Прості, здебільшого sp^3 - sp^3 σ-зв'язки в цих сполуках мало впливають на їх енергетичні характеристики і у випадку таких речовин застосування цієї формули значних похибок не викликає. В більш складних молекулах на результат помітно впливають внутрішньомолекулярна і міжмолекулярна взаємодія між собою хімічних елементів і їх угрупувань: індукційний вплив, впливи хімічного поля, енергія напруги і інше. І чим молекула складніша, тим достовірність отриманих даним розрахунком значень менша. По суті, метод є емпіричним, позбавленим будь-якого теоретичного обґрунтування.

Значно ближчими до дійсного значення є результати розрахунку за методом Хандрика [23], в якому основний розрахунок за інгредієнтами, пов'язаними з атомарним складом, доповнюється поправками на особливість будови даної молекули, зокрема на розгалуженість кістяку, присутність карбонових циклів, наявність в молекулі подвійних чи потрійних зв'язків, гідроксильних, карбонільних чи карбоксильних груп, гетерозамісників і ін. Поправки знов-таки емпіричні, і розрахунок вимагає таблиць з цими попередньо визначеними константами на наявні структурні особливості. В стандартній формулі

$$-\Delta H^\circ_{зг.} = 4,184(\sum a_1 + 2\beta \sum b_1) \quad (3)$$

коефіцієнт β визначається як стехіометрій коефіцієнт перед молекулою кисню у хімічному рівнянні згорання даної речовини в кисні. Це, до речі, супроводжується деякими похибками. Адже в хімічному рівнянні згорання, для всіх ізомерних сполук коефіцієнт β буде однаковим, а теплота згорання, яка

залежить і від будови молекули, насправді відрізняється. Зокрема, це стосується молекул, які в структурі містять гетерогенні, наприклад гліцидні, циклі, і ізомерних ним молекул без таких особливостей структури. Основні структурні константи a_1 та b_1 вважаються сталими для насичених нерозгалужених вуглеводнів і наведені у відповідних таблицях. Додаткові поправки теж зведені у таблицях і повинні додаватися (або, в залежності від наведеного знаку, відніматися) до основних структурних констант. Метод більш точний, але менш зручний. До того ж, врахувати всі різновиди структурних видозмін органічних молекул неможливо і для багатьох молекул метод просто непридатний.

Теоретично найбільш обґрунтованим виглядає метод визначення теплоти згорання із залученням енергій зв'язків між атомами [24]. Потрібне значення вираховується за різницею суми таких енергій в продуктах реакції і у вихідних речовинах:

$$-\Delta H^{\circ}_{зг.} = \sum E_{пр.} - \sum_{вих.} \quad (4)$$

Це дає змогу врахувати взаємний вплив на теплоту згорання молекули атомів, пов'язаних між собою (ближній вплив). Але взаємний внутрішньомолекулярний і міжмолекулярний вплив груп атомів і тут залишається поза увагою.

Проведення розрахункових досліджень

За формулою Д.І. Менделєєва

При розрахунках за цією формулою спочатку обчислювалися молекулярна маса кожної сполуки (М) і відсотковий вміст в ній карбону [С], гідрогену [Н] та оксигену [О]. Далі за формулою (2) знаходилася вища теплота згорання ($Q_{вища}$) у кДж/кг, яка переводилася у мольну теплоту згорання за формулою

$$\Delta H^{\circ}_{зг.} = MQ_{вища}/1000(кДж/моль) \quad (5)$$

Отримані результати наведені в таблицях 1 та 2.

Таблиця 1 – Склад досліджених етерів гліцидолу

№ з/п	Речовина	Валова формула	М	Вміст, %		
				[С]	[Н]	[О]
1	2	3	4	5	6	7
1	Метилгліцидол	$C_4H_8O_2$	88	54,55	9,09	36,36
2	Етилгліцидол	$C_5H_{10}O_2$	102	58,82	9,80	31,38
3	н-Бутилгліцидол	$C_7H_{14}O_2$	130	64,62	10,76	24,62
4	трет.-Бутилгліцидол	$C_7H_{14}O_2$	130	64,62	10,76	24,62

Таблиця 2 – Розрахунок за формулою Д.І. Менделєєва теплоти згорання досліджених етерів

№ з/п	Речовина	339,4С	1257Н	-108,9О	$Q_{вища}$, кДж/кг	М	$-\Delta H^{\circ}_{зг.}$, кДж/моль
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Метилгліцидол	18514,27	11426,13	-3959,60	25980,80	88	2286,31
2	Етилгліцидол	19963,51	12318,60	-3417,28	28864,83	102	2944,21
3	н-Бутилгліцидол	21932,03	13525,32	-2681,12	32776,23	130	4260,91
4	трет.-Бутилгліцидол	21932,03	13525,32	-2681,12	32776,23	130	4260,91

За методом Хандрика

При цих розрахунках спочатку з хімічного рівняння згорання кожного етеру гліцидолу у кисні визначався стехіометричний коефіцієнт β.

$C_4H_8O_2 + 5O_2 = 4CO_2 + 4H_2O$ β=5

Метилгліцидол

$C_5H_{10}O_2 + 6{,}5O_2 = 5CO_2 + 5H_2O$ β=6,5

Етилгліцидол

$C_7H_{14}O_2 + 9{,}5O_2 = 7CO2 + 7H_2O$ β=9,5

Бутилгліцидоли

Основні структурні константи для нерозгалужених насичених вуглеводнів за нормальних умов в стані рідини дорівнюють: a_1=5,7; $в_1$=52,08 [23]. З чотирьох досліджених етерів гліцидолу розгалуження карбонового кістяку має тільки трет.-Бутилгліцидол. Тож у випадку цієї сполуки до константи a_1 треба додати (-3.7). а до константи $в_1$ +0,09 [23]. Всі чотири похідні гліцидолу за нормальних умов знаходяться в стані рідини і містять етерну групу. Тому до константи a_1 треба додати 15,5, а до константи $в_1$ 0,02 [21]. Крім того, у всіх чотирьох рідинах наявне епоксидне кільце. Це виливається в необхідність додати до константи a_1 41,0, а до константи $в_1$ (-1,05). В методі Хандрика за формулою (3) теплота згорання отримується у мольній формі: $\Delta H^\circ_{зг.} = 4{,}184(\sum a_1 + 2\beta\sum b_1)$. Задля наочності вона перераховувалася і у більш звичні одиниці виміру за формулою

$$\text{и } Q_{вища} = 1000\Delta H^\circ_{зг}/M \qquad (6)$$

Отримані результати наведені в таблицях 3 та 4.

Таблиця 3 – Розрахунок констант формули Хандрика для досліджених етерів гліцидолу

№ з/п	Речовина	Константи									
		a_1					$в_1$				
		Осн.	Додаткові			Разом	Осн.	Додаткові			Разом
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Метилгліцидол	5,7	-	15,5	41,0	62,2	52,08	-	0,02	-1,05	51,05
2	Етилгліцидол	5,7	-	15,5	41,0	62,2	52,08	-	0,02	-1,05	51,05
3	н-Бутилгліцидол	5,7	-	15,5	41,0	62,2	52,08	-	0,02	-1,05	51,05
4	трет.-Бутилгліцидол	5,7	-3,7	15,5	41,0	58,5	52,08	0,09	0,02	-1,05	51,14

Таблиця 4 – Розрахунок за формулою Хандрика теплоти згорання досліджених етерів

№ з/п	Речовина	β	a_1	$в_1$	$-\Delta H^\circ_{зг.}$, кДж/моль	M	$Q_{вища}$, кДж/кг
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Метилгліцидол	5	62,2	51,05	2396,18	88	27229,28
2	Етилгліцидол	6,5	62,2	51,05	3036,96	102	29774,08
3	н-Бутилгліцидол	9,5	62,2	51,05	4318,52	130	33219,35
4	трет.-Бутилгліцидол	9,5	58,5	51,14	4310,19	130	33155,30

За різницею енергій зв'язків

Утворення з атомів хімічного зв'язку між ними супроводжується виділенням певної кількості енергії. При умові вимірювання за стандартних умов, цю кількість позначають як енергію даного типу зв'язків. Сума таких енергій при утворенні речовини визначається як енергія утворення речовини (Е) і вимірюється у кДж/моль. Ця енергія являє собою міру міцності зв'язку між атомами в даній молекулі. На розрив зв'язку чисельно необхідно витратити ту ж кількість енергії, яка була виділена при його утворенні. За умов ненадходження енергії (теплоти) ззовні, реакції між речовинами, у тому числі реакція горіння, можливі лише, якщо утворення продуктів реакції супроводжується виділенням більшої кількості енергії за рахунок створення нових зв'язків, ніж її витрачається на розрив старих, тобто коли загальна енергія системи зменшується. В реакціях горіння зменшення енергії системи відбувається шляхом виділення теплоти згорання. Отже, вимірюючи теплоту згорання в термоізольованому приладі, можна точно визначити різницю між сумою енергій зв'язків продуктів згорання і сумою енергій зв'язків вихідних речовин. А, значить, законною є і зворотна операція – розрахунок теплоти згорання за різницею між сумою енергій зв'язків продуктів згорання і сумою енергій зв'язків вихідних речовин. Енергії найбільш типових

зв'язків визначалися великою кількістю дослідників і найбільш вірогідні значення наводяться в довідниковій літературі. Однак переоцінювати точність цього методу теж не варто, так як в літературі представлені дані, отримані при спалюванні лише відносно простих речовин: молекул H_2, CO, CH_4 і т.п. А енергія зв'язку між атомами в молекулі залежить не тільки від атомів, пов'язаних між собою, а і від їх хімічного оточення, яке результується в індукційний вплив, ефект впливу кратних зв'язків і, як в нашому випадку, ефект напруженості епоксидного циклу. Тим не менше, застосування цього методу у випадку простих речовин, завдяки своїй простоті, має певні переваги. З структурних формул досліджених етерів гліцидолу можна зробити висновок про типи зв'язків між атомами в їх молекулах і про кількість таких зв'язків, а з наведених вище хімічних рівнянь згорання цих речовин в кисні – про типи зв'язків між атомами в продуктах згорання і, відповідно, про кількість таких зв'язків.

Метилгліцидол

$CH_2 - CH - CH_2 - O - CH_3$ (O) — 2 C - C, 8 C – H, 4 C - O

Етилгліцидол

$CH_2 - CH - CH_2 - O - C_2H_5$ (O) — 3 C - C, 10 C – H, 4 C - O

н-Бутилгліцидол

$CH_2 - CH - CH_2 - O - C_4H_9$ (O) — 5 C - C, 14 C – H, 4 C – O

трет.-Бутилгліцидол

$CH_2 - CH - CH_2 - O - C(CH_3)_3$ (O) — 5 C - C, 14 C – H, 4 C – O

O_2 — 1 O = O

H_2O — 2 O - H

CO_2 — 2 C = O

При розрахунках приймалося (після переводу довідкових даних з ккал/моль до кДж/моль): E_{C-C}=262,93 кДж/моль; E_{C-H}=358,39 кДж/моль; $E_{O=O}$=490,69 кДж/моль; E_{O-H}=418,68 кДж/моль; $E_{C=O}$(в CO_2)=703,38 кДж/моль; E_{C-O}(в етерах)=314,01 кДж/моль; з огляду на відсутність даних, для E_{C-O}(в епоксидах), цю величину прийнято такою ж, 314,01 кДж/моль.

Отримані результати розрахунку сумарних значень енергій зв'язків наведені в таблицях 5 та 6.

Таблиця 5 – Сумарне значення енергій зв'язків в молекулах лівої частини хімічного рівняння реакції горіння однієї молекули речовини

№ з/п	Речовина	Енергія зв'язків, кДж/моль				
		C - C	C – H	C – O	O = O	Разом
1	2	3	4	5	6	7
1	Метилгліцидол	2x262,93 =525,86	8x358,39 =2867,12	4x314,01 =1256,04	5x490,69 =2453,45	7102,83
2	Етилгліцидол	3x262,93 =788,79	10x358,39 =3583,90	4x314,01 =1256,04	6,5x490,69 =3189,49	8818,22
3	н-Бутилгліцидол	5x262,93 =1314,65	14x358,39 =5017,46	4x314,01 =1256,04	9,5x490,69 =4661,56	12249,71
4	трет.-Бутилгліцидол	5x262,93 =1314,65	14x358,39 =5017,46	4x314,01 =1256,04	9,5x490,69 =4661,56	12249,71

Таблиця 6 – Сумарне значення енергій зв'язків в молекулах правої частини хімічного рівняння реакції горіння однієї молекули речовини

№ з/п	Речовина	Енергія зв'язків, кДж/моль		
		O - H	C = O	Разом
1	2	4	5	6
1	Метилгліцидол	8x418,68 = 3349,44	8x703,38 = 5627,04	8976,48
2	Етилгліцидол	10x418,68 = 4186,80	10x703,38 = 7033,80	11220,60
3	н-Бутилгліцидол	14x418,68 = 5861,52	14x703,38 = 9847,32	15708,84
4	трет.-Бутилгліцидол	14x418,68 = 5861,52	14x703,38 = 9847,32	15708,84

Результати розрахунку теплоти згорання досліджених етерів гліцидолу за методом різниці суми енергій зв'язків між атомами в продуктах згорання цих речовин і суми енергій зв'язків між атомами у вихідних речовинах наведені в таблиці 7.

Таблиця 7 – Розрахунок теплоти згорання етерів гліцидолу

№ з/п	Речовина	Енергія зв'язків, кДж/моль		$-\Delta H^{\circ}_{зг.}$, кДж/моль	M	$Q_{вища}$, кДж/кг
		Продуктів згорання	Вихідних речовин			
1	2	4	5	6	7	8
1	Метилгліцидол	8976,48	7102,83	1873,50	88	2129,15
2	Етилгліцидол	11220,60	8818,22	2408,36	102	2361,16
3	н-Бутилгліцидол	15708,84	12249,71	3459,13	130	2660,87
4	трет.-Бутилгліцидол	15708,84	12249,71	3459,13	130	2660,87

Результати порівняння значень теплоти згорання досліджених етерів гліцидолу, отриманих розрахунковими методами, зі знайденими раніше експериментальними даними [21] і абсолютні та відносні похибки кожного розрахунку наведені в таблиці 8.

Таблиця 8 – Порівняння значень теплоти згорання

№ з/п	Речо-вина	Результати визначення теплоти згорання, $-\Delta H^{\circ}_{зг.}$, кДж/моль									
		Експер.	Розрахунок								
			За Менделєєвим			За Хандриком			За енергіями зв'язків		
			$-\Delta H^{\circ}_{зг}$	Δ	δ, %	$-\Delta H^{\circ}_{зг}$	Δ	δ, %	$-\Delta H^{\circ}_{зг}$	Δ	δ, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	2355,6	2286,3	69,3	2,9	2396,2	40.6	1,7	1873,5	482,1	20,5
2	2	3033,9	2944,2	86,4	2,8	3037,0	3.1	0,1	2408,3	625,6	20,6
3	3	4392,2	4260,9	131,3	3,0	4318,5	73,7	1,7	3459,1	933,1	21,2
4	4	4379,0	4260,9	131,3	3,0	4310,2	68,8	1,6	3459,1	919,9	21,0

Висновки та напрями подальших досліджень. Розрахунок теплоти згорання етерів гліцидолу за формулою Д.І.Менделєєва дає результат, більший дійсного на 3,0%, розрахунок за методом Хандрика – результат, більший дійсного на 1,7%. Формальний же розрахунок за енергіями зв'язків не враховує внутрішньомолекулярного впливу атомів і груп атомів та міжмолекулярного впливу молекул, а головне, енергії напруженості в епоксидному циклі. А напруженість в циклі

значно ослаблює і зв'язки С-О, і зв'язок С-С.

Отже, дійсна сума енергій зв'язків в лівій частині реакції згорання етерів гліцидолу менша, ніж розрахована за формальною процедурою. Відповідно, в дійсності, різниця між сумою енергій

зв’язків між атомами в продуктах згорання цих речовин і сумою енергій зв’язків між атомами у вихідних речовинах є більшою за розраховану.

В подальшому планується на основі результатів, отриманих в даному дослідженні, розрахувати дійсне значення суми енергій зв’язку С-О і зв’язку С-С в цьому циклі. Це дозволить (після перевірки на інших епоксидних сполуках) при розрахунку теплоти горіння для подібних речовин користуватися не помилковими (для даного випадку) значеннями енергій зв’язку С-О і зв’язку С-С в епоксидах, а безпосередньо сумою енергій цих зв’язків, більш наближеною до реальності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. May, C. (2021). *Epoxy Resins: Chemistry and Technology* (3-тє вид.). CRC Press.
2. Crivello, J. V., & Lee, H. (2014). Epoxy Resins. *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*. Wiley. https://doi.org/10.1002/0471440264.pst060
3. Zhang, K., Feng, Y., та ін. (2017). *Method for preparing epoxy-peroxides and use thereof in polymeric materials* (Пат. US 20170114041A1). США. № 15/348317.
4. Gutierrez, L., Fisher, R., та ін. (2019). *Rubber composition based on unsaturated elastomers and method for improved sulfur vulcanization* (Пат. US 20190328622A1). США. № 16/161372.
5. Єлагін, Г. І. (2000). Епоксипероксид. Синтез, властивості, застосування. *Хімічна промисловість України*, *3*, 37-39.
6. Jeong Tai, Z. Kim. (2009). 3-Aminopropyltriethoxysilane effect on thermal and mechanical properties of multi-walled carbon nanotubes reinforced epoxy composites. *Composite Materials*, *43*(22), 2533-2541.
7. Червінський, Т. І., Яцишин, О. І., & Братичак, М. М. (2011). Одержання пероксидної метакриловмісної похідної діанової епоксидної смоли ЕД-22 та її застосування. *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”*, *(700)*, 446–451.
8. Jatsyshyn, O., Astakhova, O., Lazorko, O., та ін. (2013). Monomethacrylate Derivative of Derivative of ED-24 Epoxy Resin and its Application. *Chemistry and Chemical Technology*, *7*(1), 73–77.
9. Братичак, М. М., Башта, Б. Б., Дончак, В. А., та ін. (2014). Карбоксилвмісний пероксидний олігомер з епоксидними групами. *Український хімічний журнал*, *80*(6), 117–122.
10. Івашків, О. П., Астахова, О. Т., & Братичак, М. М. (2015). Реакційноздатний олігомер на основі гідроксилпохідної епоксидної смоли та акрилової кислоти. В *Актуальні проблеми хімії та технології органічних речовин (APCTOS2): Матеріали II Міжнародної наукової конференції* (с. 75). Львів.
11. Мустафа, Л. М., Ізмайлов, М. Б., & Санін, А. Ф. (2020). Дослідження впливу пластифікаторів і термопластиків на жорсткість і міцність епоксидних смол. *Науковий вісник Національного гірничого університету*, *(4)*, 63-68.
12. Лавренюк, О., Кочубей, В., Баланюк, В., Лінінська, О., & Бутуліна, Н. (2007). Оцінка термостабільності композиційних матеріалів на основі епоксидних смол. *Пожежна безпека*, *(11)*, 37-42.
13. Букетов, А. В., Акімов, О. В., & Браїло, М. В. (2015). Дослідження адгезійних властивостей полімерних композитів на основі епоксидної смоли, полімеризованої ізометилтетрагідрофталевим ангідридом. *Вісник Херсонського національного технічного університету*, 93–98.
14. Полоз, О. Ю., Просяник, О. В., Фарат, О. К., & Ебіч, О. Р. (2024). Оцінка активності амінних отверджувачів епоксидних смол. *Питання хімії і хімічної технології*, *(2)*, 83-89.
15. Jeong Tai, Z. Kim. (2009). 3-Aminopropyltriethoxysilane effect on thermal and mechanical properties of multi-walled carbon nanotubes reinforced epoxy composites. *Composite Materials*, *43*(22), 2533-2541.
16. Стухляк, П. Д., Букетов, А. В., & Тотосько, О. В. (2014). Модифікація епоксидних матеріалів електрогідравлічним ударом. *Вісник Технологічного університету Поділля*, *(1)*, 47–49.
17. Mercado, L. A., Reina, J. A., & Galia, M. (2006). Flame retardant Epoxy resins Based on Diglycidyloxymethylphenylsilane. *J. Piolym. Sci., Part A: Polym. Chem.*, *(44)*, 5580–5587.
18. Sponton, M., Mercado, L. A., Reina, J. A., & Galia, M. (2008). Preparation, thermal properties and flame retardancy of phosphorus- and silicon-containing epoxy resins. *Polymer Degradation and Stability*, *(93)*, 2025–2031.
19. Лавренюк, О., Міхалічко, Б., Пастухов, П., & Петровський, В. (2014). Модифіковані купрум сульфатом самозгасаючі епоксиамінні композиції: технологія отримання та горючі властивості. *Пожежна безпека*, *25*.
20. Пастухов, П., Лавренюк, О., Міхалічко, Б., & Петровский, В. (2018). Особливості впливу купрум карбонату на схильність до займання епоксіамінних композицій. *Пожежна безпека*, *(33)*.
21. Нуянзін, В., Майборода, А., Мельник, О., Даник, О., Ведула, С., & Лесечко, Д. (2024). Визначення теплоти утворення алкілгліцидних етерів для оцінки їх пожежної небезпеки. *Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*, *8*(2).
22. Greenwood, N. (2019). Mendeleev and the Periodic Table. *Nature Chemistry*, *11*, 391–393.
23. Handrick, G. R. (1956). Heats of Combustion of Organic Compounds. *Industrial and Engineering Chemistry*, *48*(8), 1366-1374.
24. Єлагін, Г. І., Алексєєв, А. Г., & Наконечний, В. В. (2000). Аналіз методів розрахунку теплоти згорання матеріалів. *Пожежна безпека. Теорія і практика. Збірник наукових праць*, *(3)*, 37-39.

REFERENCES

1. May, C. (2021). *Epoxy Resins: Chemistry and Technology* (3rd ed.). Boca Raton: CRC Press. [in English]
2. Crivello, J. V., & Lee, H. (2014). Epoxy Resins. *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*. Hoboken, NJ: Wiley. https://doi.org/10.1002/0471440264.pst060 [in English]
3. Zhang, K., Feng, Y., et al. (2017). *Method for preparing epoxy-peroxides and use thereof in polymeric materials* (U.S. Patent No. US 20170114041A1). United States Patent and Trademark Office. [in English]
4. Gutierrez, L., Fisher, R., et al. (2019). *Rubber composition based on unsaturated elastomers and method for improved sulfur vulcanization* (U.S. Patent No. US 20190328622A1). United States Patent and Trademark Office. [in English]
5. Yelahin, H. I. (2000). Epoksyperoksyd. Syntez, vlastyvosti, zastosuvannia [Epoxy peroxide. Synthesis, properties, application]. *Khimichna promyslovist Ukrainy* [Chemical Industry of Ukraine], *(3)*, 37-39. [in Ukrainian]
6. Jeong Tai, Z. Kim. (2009). 3-Aminopropyltriethoxysilane effect on thermal and mechanical properties of multi-walled carbon nanotubes reinforced epoxy composites. *Composite Materials*, *43*(22), 2533-2541. [in English]
7. Chervinskyi, T. I., Yatsyshyn, O. I., & Bratychak, M. M. (2011). Oderzhannia peroksydnoi metakrylovvmisnoi pokhidnoi dianovoi epoksydnoi smoly ED-22 ta yii zastosuvannia [Obtaining a peroxide-containing methacrylic derivative of diane epoxy resin ED-22 and its application]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika"* [Bulletin of the Lviv Polytechnic National University], *(700)*, 446–451. [in Ukrainian]
8. Jatsyshyn, O., Astakhova, O., Lazorko, O., et al. (2013). Monomethacrylate Derivative of Derivative of ED-24 Epoxy Resin and its Application. *Chemistry and Chemical Technology*, *7*(1), 73–77. [in English]
9. Bratychak, M. M., Bashta, B. B., Donchak, V. A., et al. (2014). Karboksilvmisnyi peroksydnyi olihomer z epoksydnymy hrupamy [Carboxyl-containing peroxide oligomer with epoxy groups]. *Ukrainskyi khimichnyi zhurnal* [Ukrainian Chemical Journal], *80*(6), 117–122. [in Ukrainian]
10. Ivashkiv, O. P., Astakhova, O. T., & Bratychak, M. M. (2015). Reaktsiinozdatnyi olihomer na osnovi hidroksylpokhidnoi epoksydnoi smoly ta akrylovoi kysloty [Reactive oligomer based on a hydroxyl derivative of epoxy resin and acrylic acid]. In *Aktualni problemy khimii ta tekhnolohii orhanichnykh rechovyn (APCTOS2): Materialy II Mizhnarodnoi naukovoi konferentsii* [Current problems of chemistry and technology of organic substances (APCTOS2): Proceedings of the II International Scientific Conference] (p. 75). Lviv. [in Ukrainian]
11. Mustafa, L. M., Izmailov, M. B., & Sanin, A. F. (2020). Doslidzhennia vplyvu plastyfikatoriv i termoplastykiv na zhorstkist i mitsnist epoksydnykh smol [Investigation of the effect of plasticizers and thermoplastics on the rigidity and strength of epoxy resins]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu* [Scientific Bulletin of the National Mining University], *(4)*, 63-68. [in Ukrainian]
12. Lavrenyuk, O., Kochubei, V., Balaniuk, V., Lininska, O., & Butulina, N. (2007). Otsinka termostabilnosti kompozytsiinykh materialiv na osnovi epoksydnykh smol [Evaluation of the thermal stability of composite materials based on epoxy resins]. *Pozhezhna bezpeka* [Fire Safety], *(11)*, 37-42. [in Ukrainian]
13. Buketov, A. V., Akimov, O. V., & Brailo, M. V. (2015). Doslidzhennia adheziinykh vlastyvostei polimernykh kompozytiv na osnovi epoksydnoi smoly, polimeryzovanoi izometyltetrahidroftalevoyu anhidrydu [Investigation of the adhesive properties of polymer composites based on epoxy resin polymerized with isomethyltetrahydrophthalic anhydride]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu* [Bulletin of the Kherson National Technical University], 93–98. [in Ukrainian]
14. Poloz, O. Yu., Prosyanyk, O. V., Farat, O. K., & Ebich, O. R. (2024). Otsinka aktyvnosti aminnykh otverdzhuva-chiv epoksydnykh smol [Evaluation of the activity of amine hardeners of epoxy resins]. *Pytannia khimii i khimichnoi tekhnolohii* [Problems of Chemistry and Chemical Technology], *(2)*, 83-89. [in Ukrainian]
15. Jeong Tai, Z. Kim. (2009). 3-Aminopropyltriethoxysilane effect on thermal and mechanical properties of multi-walled carbon nanotubes reinforced epoxy composites. *Composite Materials*, *43*(22), 2533-2541. [in English]
16. Stukhliak, P. D., Buketov, A. V., & Totosko, O. V. (2014). Modyfikatsiia epoksydnykh materialiv elektrohidravlichnym udarom [Modification of epoxy materials by electrohydraulic shock]. *Visnyk Tekhnolohichnoho universytetu Podillia* [Bulletin of the Technological University of Podillya], *(1)*, 47–49. [in Ukrainian]
17. Mercado, L. A., Reina, J. A., & Galia, M. (2006). Flame retardant Epoxy resins Based on Diglycidyloxymethylphenylsilane. *J. Polym. Sci., Part A: Polym. Chem.*, *(44)*, 5580–5587. [in English]
18. Sponton, M., Mercado, L. A., Reina, J. A., & Galia, M. (2008). Preparation, thermal properties and flame retardancy of phosphorus- and silicon-containing epoxy resins. *Polymer Degradation and Stability*, *(93)*, 2025–2031. [in English]
19. Lavrenyuk, O., Mikhalichko, B., Pastukhov, P., & Petrovskyi, V. (2014). Modyfikovani kuprum sulfatom samozhasaiuchi epoksiaminni kompozytsii: tekhnolohiia otrymannia ta horiuchi vlastyvosti [Copper sulfate modified self-extinguishing epoxy-amine compositions: production technology and combustible properties]. *Pozhezhna bezpeka* [Fire Safety], *25*. [in Ukrainian]
20. Pastukhov, P., Lavrenyuk, O., Mikhalichko, B., & Petrovskyi, V. (2018). Osoblyvosti vplyvu kuprum karbonatu na skhylnist do zaimannia epoksiaminnykh kompozytsii [Features of the effect of copper carbonate on the flammability of epoxy-amine compositions]. *Pozhezhna bezpeka* [Fire Safety], *(33)*. [in Ukrainian]
21. Nuianzin, V., Maiboroda, A., Melnyk, O., Danyk, O., Vedula, S., & Lesechko, D. (2024). Vyznachennia teploty utvorennia alkilhlytsydnykh eteriv dlia otsinky yikh pozhezhnoyi nebezpeky [Determination of the heat of formation of alkyl glycidyl ethers to assess their fire hazard]. *Zbirnyk naukovykh prats Cherkaskoho instytutu pozhezhnoyi bezpeky imeni Heroiv Chornobylia Natsionalnoho universytetu tsyvilnoho zakhystu Ukrainy «Nadzychayni sytuatsii: poperedzhennia ta likvidatsiia»* [Collection of Scientific Works of the Cherkasy Institute of Fire Safety named after the Heroes of Chernobyl of the National University of Civil Protection of Ukraine "Emergency Situations: Prevention and Liquidation"], *8*(2). [in Ukrainian]
22. Greenwood, N. (2019). Mendeleev and the Periodic Table. *Nature Chemistry*, *11*, 391–393. [in English]
23. Handrick, G. R. (1956). Heats of Combustion of Organic Compounds. *Industrial and Engineering Chemistry*, *48*(8), 1366-1374. [in English]
24. Yelahin, H. I., Aleksieiev, A. H., & Nakonechnyi, V. V. (2000). Analiz metodiv rozrakhunku teploty zhorannia materialiv [Analysis of methods for calculating the heat of combustion of materials]. *Pozhezhna bezpeka. Teoriia i praktyka. Zbirnyk naukovykh prats* [Fire Safety. Theory and Practice. Collection of Scientific Papers], *(3)*, 37-39. [in Ukrainian]

COMPARISON OF EXPERIMENTAL AND CALCULATED VALUES OF COMBUSTION HEAT OF ALKYL GLYCIDE ETHERS AS AN ELEMENT OF ENSURING CIVIL SAFETY

V. Nuianzin, A. Maiboroda, O. Danyk, D. Zhurbynskyi, S. Honchar, I. Nozhko

National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine

KEYWORDS

heat of combustion, glycidol ethers, experimental methods, calculation methods, comparison of the accuracy of methods

ABSTRACT

The heats of combustion of four glycidol ethers - the most typical representatives of epoxy compounds, determined experimentally and calculated by methods, used in the theory of combustion - were compared. In reference books and literary sources, information on these values is given only for individual representatives and only determined experimentally. Meanwhile, since the middle of the last century, epoxy compounds have been widely used in industry and in everyday life. Having a significant percentage of carbon and hydrogen in their composition, they all belong to combustible substances. In addition, the lower representatives of this series are quite volatile (the boiling point of methyl glycidol is 110^0C), which requires attention to ensuring civil safety during their production and use. One of the most important indicators of the fire hazard of substances is the heat of combustion. The latter can be determined quickly and without significant costs in each specific case by calculation. But, given the presence of significant strain energy in the epoxy cycle, the calculation by known methods in this case is accompanied by significant errors. To obtain reliable data, it is necessary to estimate these errors, which in this case each of the methods gives and to determine the directions of improvement of the most suitable of the methods. The calculation of the heat of combustion of methyl glycidol, ethyl glycidol, n-butyl glycidol and tert.-butyl glycidol was carried out according to the formula of D.I. Mendeleev, according to the Handrick method and according to the difference in bond energies between atoms in the initial glycidol ethers and in the products of their combustion. The calculation error by each of the methods was estimated by comparing the obtained values with the actual values of the heats of combustion, found earlier by experimental combustion of these ethers in a calorimetric bomb. It was found that the calculation of the heat of combustion of glycidol ethers according to the D.I. Mendeleev formula gives a result that is 3.0% higher than the actual value, while the calculation according to the Handrick method gives a result that is 1.7% higher than the actual value. The formal calculation according to bond energies does not take into account the intermolecular effect of atoms and groups of atoms and the intermolecular effect of molecules, and most importantly, the energy of tension in the epoxy cycle. The tension in the epoxy cycle significantly weakens both carbon-carbon and carbon-oxygen bonds. The latter results in obtaining results that are significantly (about 20%) lower than the actual ones. According to the results of the study, it is recommended to choose the calculation according to the Handrick method when estimating the heat of combustion of epoxy compounds at the moment. Despite the empirical nature of this method, it provides quite acceptable results. In the future, to use a theoretically justified method of calculation based on bond energies between atoms, it is necessary to establish the exact value of the tension in the epoxy cycle.

УДК 614.841.41

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПОШИРЕННЯ ПОЛУМ'Я ТА ТЕМПЕРАТУРНОГО ВПЛИВУ ПОЖЕЖІ В ПРИМІЩЕННІ БАЗОВОЇ СТАНЦІЇ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ

https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.1.(19).15-23

Фещук Ю. Л.[1], ORCID iD 0000-0003-4328-8473
Циганков А. О.[1*], ORCID iD 0000-0003-1971-9640
Мельник В. І.[1], ORCID iD 0000-0002-2659-9942
Бедратюк О. І.[1], ORCID iD 0000-0002-0642-9399
Шевченко К. Р.[2], ORCID iD 0009- 0005-1774-4174
*E-mail: 0502879336@ukr.net

[1]*Інститут наукових досліджень з цивільного захисту НУЦЗ України, Україна*
[2]*Білоцерківський національний аграрний університет, Україна*

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ
Надійшла до редакції: 11.03.2025
Пройшла рецензування: 04.04.2025

КЛЮЧОВІ СЛОВА:
базова станція мобільного зв'язку, поширення полум'я, температурний вплив пожежі, критерії оцінювання пожежної небезпеки, термопари.

АНОТАЦІЯ
Виявлено проблему щодо економічної недоцільності оснащення приміщень базової станції мобільного зв'язку автоматичними системами пожежогасіння з точки зору захисту обладнання. Встановлено неузгодженості між вимогами ДБН В.2.5-56:2014 та НАПБ В.01.053-2016/520. Визначено найбільш пожежонебезпечні елементи приміщення базової станції мобільного зв'язку. Розроблено критерії оцінювання пожежної небезпеки базової станції мобільного зв'язку, а також сформовано перелік обладнання, що необхідне для проведення експериментальних досліджень. Запропоновано схему розташування термопар, яка найбільш точно відображає знаходження пожежо-небезпечних елементів, дає змогу здійснювати контроль температури в реальному часі та виявляти можливість займання одного елемента внаслідок горіння іншого, встановлювати можливість розповсюдження пожежі за межі приміщення базової станції мобільного зв'язку. Представлено методику, що дає можливість виконати перевірку запропонованих критеріїв з метою дослідження поширення полум'я по телекомунікаційному, електротехнічному обладнанню базової станції мобільного зв'язку та температурного впливу пожежі в приміщенні базової станції на температуру її зовнішніх стін.

Постановка проблеми. За останні 10 років на території України на базових станціях мобільного зв'язку виникло 27 пожеж. Щороку лише на 0,03 % базових станцій мобільного зв'язку від загальної кількості виникають пожежі. Основними причинами яких є: коротке замикання у вводному електрощиті, замикання кондиціонера, влучання блискавки. При цьому хибне спрацювання автоматичної системи пожежогасіння, відбулося на 0,43 % базових станцій мобільного зв'язку від загальної кількості, що в понад 10 разів перевищує фактичну кількість пожеж, які виникають на таких об'єктах. Це в свою чергу завдає колосальних збитків телекомунікаційному, електротехнічному обладнанню, що встановлено на даних об'єктах. В будь-якому випадку при спрацюванні системи пожежогасіння чи хибному чи внаслідок виникнення пожежі, обладнання, що знаходиться в приміщенні базової станції стає непридатним до використання. У зв'язку з цим постає питання економічної доцільності оснащення приміщень базової станції мобільного зв'язку автоматичними системами пожежогасіння з точки зору захисту обладнання. Таким чином виникає необхідність дослідження особливостей поширення полум'я по телекомунікаційному, електротехнічному обладнанню базової станції мобільного зв'язку, а також температурного впливу

пожежі в приміщенні базової станції на температуру її зовнішніх стін з метою встановлення реальної пожежної небезпеки, яку несе обладнання такого приміщення, ймовірності розповсюдження пожежі за межі такого приміщення. Зазначене, підтверджує актуальність проведення відповідних наукових досліджень.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. На даний час у відкритому доступі наявно багато наукових праць, що присвячені пожежній безпеці базових станцій мобільного зв'язку. Так, в роботі [1] розглядалося питання щодо обладнання приміщення базової станції мобільного зв'язку автоматичною системою пожежогасіння, разом з цим не наведено обгрунтованих рішень стосовно доцільності протипожежного захисту таких приміщень. Протипожежний захист базових станцій мобільного зв'язку у випадку виникнення пожежі ззовні такої станції внаслідок займання лісу розглянуто в [2]. Однак, не розглянуто можливе виникнення пожежі в середині приміщення базової станції мобільного зв'язку та її подальший можливий вплив на зовнішнє середовище. В статті [3] розглянуто проблему автономного оптимального розгортання базових станцій в складних протипожежних умовах висотних будівель. Разом з цим не досліджувалося питання особливостей пожежогасіння таких об'єктів. Розроблений комплекс заходів щодо попередження пожежі в приміщенні з електронно-обчислювальними машинами представлений в роботі [4], проте особливості гасіння пожежі, її вплив на ззовні не розглядався.

Варто зазначити, що в наявних наукових працях так чи інакше розглядалися особливості протипожежного захисту приміщень базових станцій мобільного зв'язку, при цьому не враховувалась економічна доцільність встановлення систем протипожежного захисту та не досліджувався вплив ймовірної пожежі базової станції на зовнішні об'єкти. Таким чином, дослідження пожежної небезпеки приміщення базової станції мобільного зв'язку в складних економічних умовах є досить актуальними.

Формулювання цілей досліджень. Метою даної роботи є обгрунтування положень методики експериментальних досліджень поширення полум'я по телекомунікаційному, електротехнічному обладнанню базової станції мобільного зв'язку та визначення температурного впливу пожежі в приміщенні базової станції на температуру її зовнішніх стін. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- проаналізувати стан вітчизняної нормативної бази щодо необхідності обладнання приміщення базової станції мобільного зв'язку автоматичною (автономною) системою пожежогасіння;
- встановити пожежну небезпеку приміщення базової станції мобільного зв'язку;
- обгрунтувати методику проведення експериментальних досліджень поширення полум'я по телекомунікаційному, електротехнічному обладнанню базової станції мобільного зв'язку та температурного впливу пожежі в приміщенні базової станції на температуру її зовнішніх стін.

Методи дослідження. В роботі застосований аналітичний метод досліджень для пошуку рішень забезпечення протипожежного захисту приміщень базових станцій мобільного зв'язку. Також застосований метод експертних оцінок з метою розроблення основних положень методики проведення експериментальних досліджень.

Виклад основного матеріалу дослідження.

За результатами аналізу вітчизняної нормативно-правової бази встановлено, що в чинних державних будівельних нормах ДБН В.2.5-56:2014 [5] визначено, що приміщення базових станцій та ретрансляторів мобільного зв'язку, які розміщені у будинках іншого призначення обладнуються автоматичними системами пожежогасіння незалежно від площі, а в окремо розташованих спеціальних будинках та спорудах – автономними системами пожежогасіння локального застосування. При цьому в Правилах пожежної безпеки в галузі зв'язку (НАПБ В.01.053-2016/520) [6] визначено, що

центри комутації мобільного зв'язку (BSC/MSC) повинні обладнуватися системами пожежної сигналізації, а при проектній потужності обладнання більше 12 кВт - автоматичними системами пожежогасіння. Інші об'єкти рухомого (мобільного) зв'язку (відповідно до цього НАПБ), що окремо розташовані, прибудовані, надбудовані та вбудовані, повинні обладнуватися системами пожежної сигналізації.

Таким чином, відсутня узгодженість між вимогами ДБН В.2.5-56:2014 та НАПБ В.01.053-2016/520. Для уникнення суперечностей між цими нормативними актами потрібні додаткові дослідження.

Типове приміщення базової станції мобільного зв’язку обладнується:

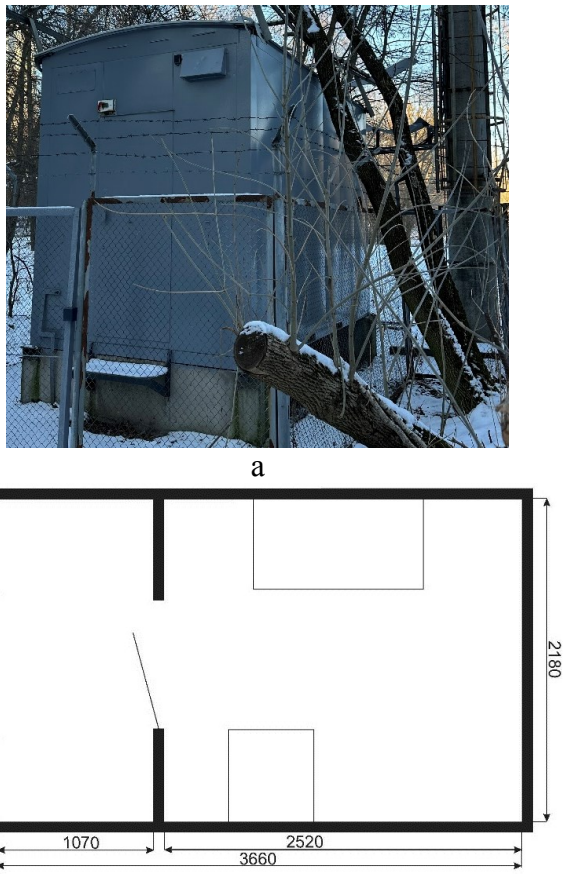
- електричною мережею, що має не менше двох електророзеток;
- електроосвітленням (не менш двох освітлювальних приладів, що забезпечують нормальну роботу персоналу (освітленість не менше 200 Люксів);
- обладнанням для забезпечення відповідних мікрокліматичних умов (кондиціонер та обігрівальна панель);
- охоронно-пожежною сигналізацією;
- кабельростами та вводами заземлення;
- електросиловим обладнанням.

Як правило приміщення базової станції мобільного зв’язку знаходиться в контейнері. Контейнер має тамбур та основне приміщення, в якому розміщується телекомунікаційне обладнання.

Контейнер комплектується зовнішніми та внутрішніми антивандальними протипожежними металевими дверима, розміри яких 800×900×2100 мм, та ґратчастою решіткою з арматури А10.

Всі дерев’яні елементи обробляються вогнезахисними засобами (антипіренами).

Загальний вигляд типового контейнеру, виготовленого з сталевих листів з його план-схемою подано на рисунку 1.



а

б

Рисунок 1 – Типовий контейнер базової станції мобільного зв’язку: а – загальний вигляд, б – план-схема

Товщина теплоізоляційних матеріалів контейнеру має бути не менше ніж 100 мм. Переріз стіни контейнера, що містить утеплювач зображено на рисунку 2 [7].

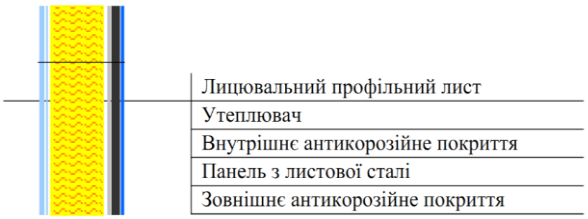


Рисунок 2 – Переріз стіни контейнера [7]

Підлога контейнеру базової станції виконується з елементів позначених на рисунку 3 [7].

Рисунок 3 – Переріз підлоги [7]

Дерев'яні лаги, настил із дошок підлоги обробляються вогнезахисними матеріалами (антипіренами) [7].

Дощата підлога покривається антистатичним лінолеумом товщиною, не менше 3 мм [7].

Стеля контейнеру базової станції виконується з елементів позначених на рисунку 4 [7].

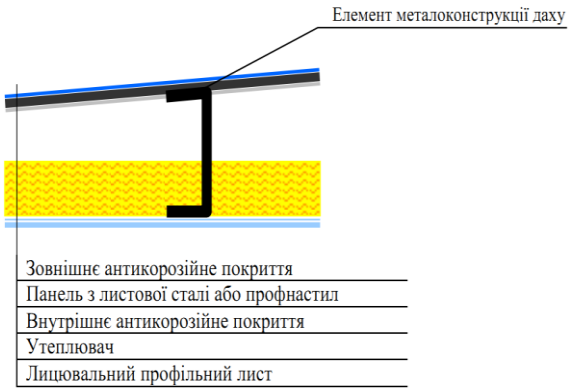


Рисунок 4 – Переріз стелі [7]

Схему розміщення обладнання в типовому приміщенні базової станції мобільного зв'язку показано на рисунку 5.

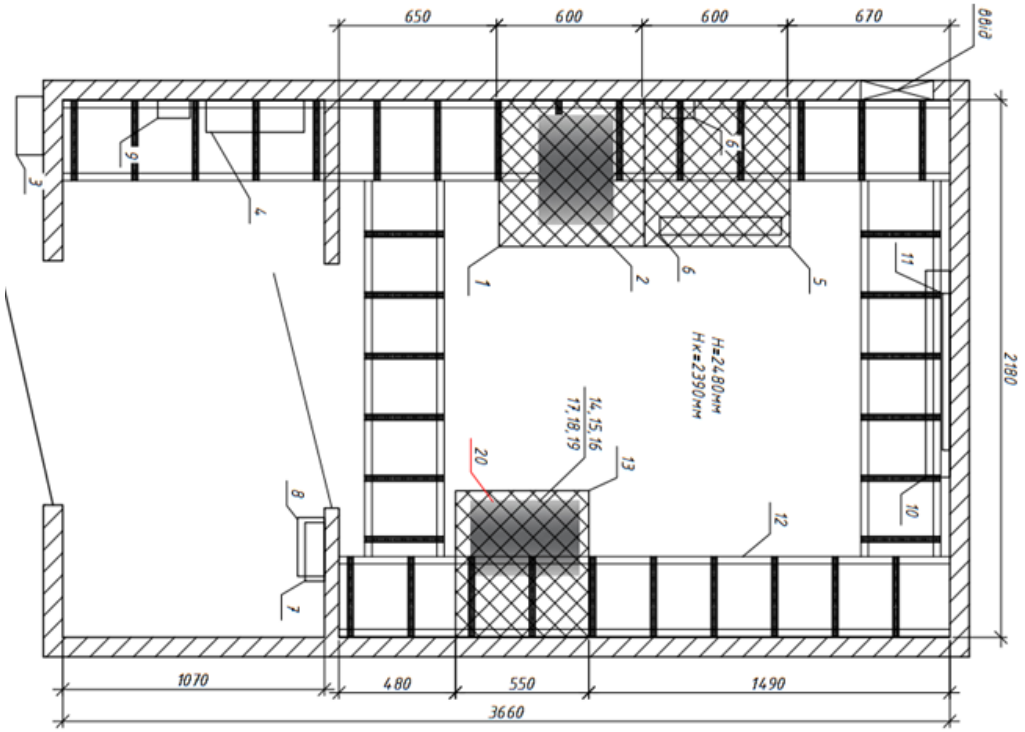


Рисунок 5 – Схема розміщення обладнання приміщення базової станції мобільного зв'язку контейнерного типу: 1 – СГЖ; 2 – акумуляторні батареї; 3 – щит обліку; 4 – щит розподільчий; 5 – стійка систем передач; 6 – панель Alarm Box; 7 – щит оповіщування пожежної сигналізації; 8 – щит управління автономною системою пожежогасіння; 9 – колодка заземлення; 10 – кондиціонер; 11 – обігрівач; 12 – кабельрост; 13 – стійка RAN19; 14 – системний модуль; 15, 16 – модуль живлення; 17, 18, 19, 20 – плата розширення

Під час вивчення пожежної небезпеки приміщення базової станції мобільного зв'язку встановлено, що дослідженню та аналізу відповідної дії на нього вогневого полум'я підлягають:

- елементи блоку керування шафи електроживлення PSS СГЖ;

- акумуляторні батареї 12V 100 А шафи електроживлення PSS СГЖ;
- елементи системного модуля, модуля живлення, плати розширення шафи 19” RAN19;
- елементи стійки систем передач СПП;
- панель комутації Alarm Box;
- обігрівач (600 Вт);
- внутрішній блок кондиціонера;
- силовий кабель гарантованого безперебійного живлення базової станції мобільного зв’язку;
- щит ввідно-розподільчий;

Аналіз нормативної бази створив передумови для визначення переліку обладнання, необхідного для проведення досліджень. Даний перелік з його технічними характеристиками приведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Технічні характеристики обладнання для досліджень

№ з/п	Найменування обладнання для досліджень	Характеристика	Значення характеристики	Одиниці вимірювання	Похибка
1.	Вимірювально-обчислювальна система «Термоконт»	Температура	від 0 до 1200	°С	Δ = ±0,6 %
2.	Блок регулятор	Сила струму	30	А	
3.	Пальник:	Потужність	1	кВт	
	Подавання пропану з вмістом не менше 95 %	Витрати за температури 23 °С, під тиском 0,1 МПа	650	мл/хв	Δ = ±30
	Подавання повітря	Витрати за температури 23 °С, під тиском 0,1 МПа	10	л/хв	Δ = ±0,5
	Висота блакитного конуса полум’я	Довжина	від 46 до 78	мм	
	Загальна висота полум’я	Довжина	від 148 до 208	мм	
4.	Фото-відеокамера	Розширення	14,2	піксель	
5.	Тепловізор				

В даному дослідженні науковий задум полягає у тому щоб на основі контролю температури у визначених місцях телекомунікаційного та електротехнічного обладнання, а також візуального огляду встановити можливість розповсюдження полум’я: від одного елементу на інший, по приміщенню в цілому, а також можливість його розповсюдження за межі приміщення. Для реалізації даного задуму необхідно розробити певні критерії. Таким чином, на основі аналізу нормативних документів [5, 8, 9] запропоновано оцінювати пожежну небезпеку базової станції мобільного зв’язку на основі наступних критеріїв:

1) тривалість самостійного горіння, що не перевищує 30 с;

2) температура нагрівання елементів, що не перевищує 70 °С;

3) відділення часток, здатних до запалювання;

4) поширення полум’я від одного елементу на інші;

5) поширення полум’я або пожежі за межі споруди контейнеру (за критичну, прийнято температуру поверхні зовнішньої стіни 250 °С);

6) наявність кіптяви на поверхнях електричного обладнання.

Контроль температури запропоновано здійснювати на елементах приміщення базової станції мобільного зв’язку відповідно до схеми поданої на рисунку 6. Запропоноване розташування термопар найбільш точно відображає знаходження пожежо-небезпечних елементів та дає змогу дослідити можливість займання одного елемента внаслідок горіння іншого.

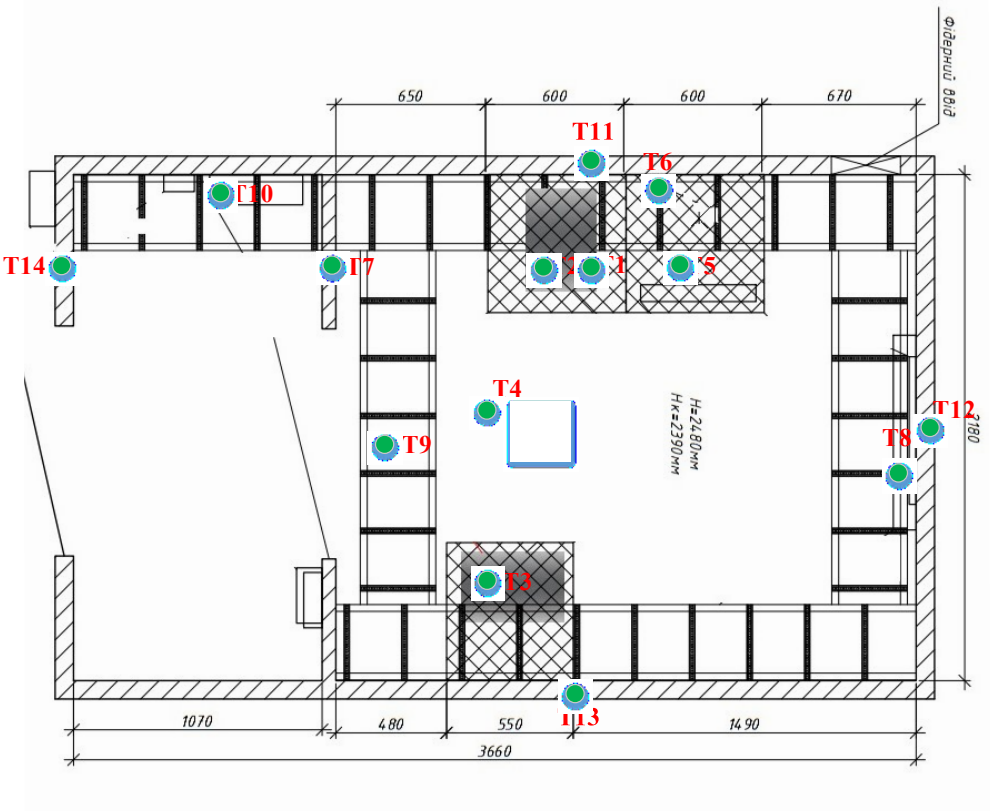


Рисунок 6 – Розміщення термопар у контрольних точках базової станції мобільного зв'язку: Т1 шафа електроживлення PSS СГЖ (верхній відсік); Т2 акумуляторні батареї 12V 100 А шафи електроживлення PSS СГЖ (верхній відсік); Т3 над елементами системного модуля, модуля живлення, плати розширення шафи 19" RAN19; Т4 на підлозі посередині між шафою 19" RAN19 та шафою електроживлення PSS СГЖ; Т5 над елементами стійки систем передач СПП; Т6 на панелі комутації Alarm Box; Т7 над обігрівачем (600Вт); Т8 над внутрішнім блоком кондиціонера Т9 на коробі проходження кабелів; Т10 на щиті ввідно-розподільчому; Т11 – Т14 по середині поверхні зовнішніх стін контейнеру базової станції мобільного зв'язку

З метою візуалізації температурних розподілів нагрівання телекомунікаційного та електротехнічного обладнання, що піддається вогневому впливу під час проведення досліджень пропонується застосовувати тепловізор.

Експериментальні дослідження проводяться в наступній послідовності:

1) Підготовчі процедури: встановлюються засоби вимірювальної техніки (термопари) згідно з схемою, поданою на рисунку 6 (термопари закріплюються за допомогою термостійкого пластичного клею з достатньою адгезією до склеюваних матеріалів); з'єднуються термопари із інформаційно-вимірювальною системою «Термоконт» і перевіряють їх працездатність; встановлюється обладнання для проведення фото- та відео зйомок; встановлюється тепловізор; готуються первинні засоби пожежогасіння; вимірюються і реєструються параметри зовнішнього середовища (температура повітря, атмосферний тиск, відносна вологість повітря, швидкість вітру); вимірюються і реєструються початкові значення температур за показниками усіх термопар та тепловізора; налаштовується газовий пальник за процедурою визначеною в [8] (випробувальне полум'я прикладають до частини обладнання, яке може бути піддане дії полум'я за умов нормальної експлуатації або внаслідок несправності). Варіанти прикладання випробувального полум'я наведено на рисунку 7. Пальник встановлюють на штатив та закріплюють за допомогою спеціальних зажимів.

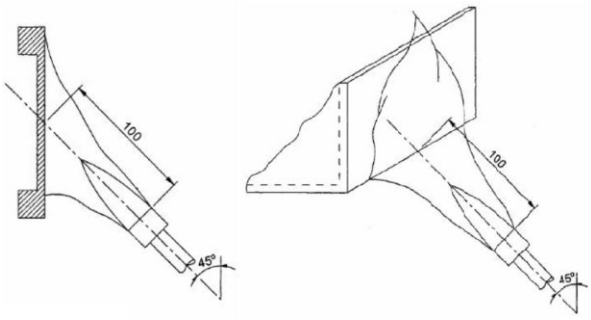


Рисунок 7 – Встановлення газового пальника відносно елементів телекомунікаційного або електротехнічного обладнання базової станції мобільного зв'язку

2) Проведення експериментальних досліджень:

- за допомогою пальника здійснюється прикладання випробувального полум'я (почергово) до: елементів блоку керування шафи електроживлення PSS СГЖ (експеримент №1); елементів системного модуля, модуля живлення, плати розширення шафи 19" RAN19 (експеримент №2); елементів стійки систем передач СПП (експеримент №3); панелі комутації Alarm Box (експеримент №4); обігрівача (600 Вт) (експеримент №5); силового кабелю гарантованого безперебійного живлення (експеримент №6); щита ввідного-розподільчого (експеримент №7); внутрішнього блоку кондиціонера (експеримент №8); акумуляторних батарей 12V 100 А (експеримент № 9) протягом 30 с за процедурою передбаченою [8];

- відведення пальника від елементів (почергово), що передбачені в експериментах № 1 – 9, візуальне спостереження щодо особливостей розповсюдження полум'я, фіксація часу самостійного горіння;

- фіксація значення температур в контрольних точках вимірювання базової станції мобільного зв'язку за допомогою термопар та інформаційно-вимірювальної системи «Термоконт», а також фіксація температури безпосередньо на обладнанні, що піддається вогневій дії полум'я пальника за допомогою тепловізора.

3) Оцінювання результатів дослідження:

За отриманими даними визначається похибка вимірювань за формулою 1.

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

де ΔA – абсолютна похибка;

ΔA_1 – похибка засобів вимірювання (термопар, приймача теплового потоку, інструментальна);

ΔA_2 – похибка вимірювальних пристроїв (вимірювально-обчислювальна система «Термоконт», похибка зняття результатів для вимірювання розмірів (зазвичай дорівнює половині ціни поділки засобів вимірювань));

к – коефіцієнт, який залежить від імовірності (к=1,1 пр Р=0,95).

Після завершення експериментальних досліджень відбувається фотофіксація пошкодження обладнання, опрацьовуються отримані дані за допомогою відповідних програмних продуктів оформлюється протокол експериментальних досліджень.

Висновки та напрями подальших досліджень

1. Виявлено проблему щодо економічної доцільності оснащення приміщень базової станції мобільного зв'язку автоматичними системами пожежогасіння з точки зору захисту обладнання. За результатами аналізу вітчизняної нормативно-правової бази встановлено, що відсутня узгодженість між вимогами ДБН В.2.5-56:2014 та НАПБ В.01.053-2016/520.

2. Встановлено найбільш пожежонебезпечні елементи приміщення базової станції мобільного зв'язку.

3. На основі аналізу нормативної бази запропоновано критерії оцінювання пожежної небезпеки базової станції мобільного зв'язку, а також перелік обладнання, що необхідний для проведення експериментальних досліджень;

4. В роботі запропоновано схему розташування термопар, яка найбільш точно відображає знаходження пожежо-небезпечних елементів, дає змогу здійснювати контроль температури в реальному часі та виявити можливість займання одного елемента внаслідок горіння іншого, встановити можливість розповсюдження пожежі за межі приміщення базової станції мобільного зв'язку;

5. Представлена в роботі методика дає можливість виконати перевірку запропонованих критеріїв з метою дослідження поширення полум'я по телекомунікаційному, електротехнічному обладнанню базової станції мобільного зв'язку та температурного впливу пожежі в приміщенні базової станції на температуру її зовнішніх стін.

Отримані, за розробленою методикою, дані будуть використані для обгрунтування доцільності обладнання приміщення базової станції мобільного зв'язку автоматичною (автономною) системою пожежогасіння, зокрема з метою не допущення розповсюдження пожежі за межі такого приміщення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ніжник В.В., Михайлов В.М., Фещук Ю.Л., Циганков А.О., Несенюк Л.П. Особливості та перспективи обладнання приміщень базових станцій мобільного зв'язку автоматичними і автономними системами пожежогасіння. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2024. № 2 (18). С. 13 – 24.
2. Góis, J. G. G. Autonomous Protection of Infrastructure Against Forest Fires (Master's thesis). 2022.
3. Ke Li , Chen Huang, Jiaping Liang and other. Research on Autonomous and Collaborative Deployment of Massive Mobile Base Stations in High-Rise Building Fire Field. 2023. DOI:10.20944/preprints202307.1962.v1.
4. Hamidovic, H., & CIA, I. Fire protection of computer rooms-legal obligations and best practices. *ISACA Journal*. 2014. № 4. P. 1-3.
5. ДБН В.2.5-56:2014. Системи протипожежного захисту. [Чинний від 2019-11-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2019. 102 с.
6. НАПБ В.01.053-2016/520. Правила пожежної безпеки в галузі зв'язку. [Чинний від 2016-05-31]. Вид. офіц. Київ : Міністерство внутрішніх справ України, 2016. 57 с.
7. СОУ.КС-ПР.Б.РД-02:2014. Стандарт організації України ПРаТ «Київстар». Опис процесів. Будівництво базових станцій мобільного стільникового зв'язку. 2014. 29 с.
8. ДСТУ 3987-2000. Випробування на пожежну небезпеку електротехнічних виробів. Частина 2. Методи випробувань. Розділ 4/0. Методи випробувань полум`ям дифузійного та попередньо змішаного типів (IEC 60695-2-4/0:1991). [Чинний від 2001-07-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2000. 10 с.
9. ДСТУ EN 60695-1-10:2018. Випробування на пожежну небезпеку. Частина 1-10. Настанова щодо оцінювання пожежної небезпеки електротехнічних виробів. Загальні методичні рекомендації (EN 60695-1-10:2017, IDT; IEC 60695-1-10:2016, IDT). [Чинний від 2018-12-10]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2018. 28 с.

REFERENCES

1. Nizhnyk V. V., Mykhailov V.M., Feshchuk Yu.L, Tsyhankov A.O., Neseniuk L.P. (2024). Osoblyvosti ta perspektyvy obladnannia prymishchen bazovykh stantsii mobilnoho zviazku avtomatychnymy i avtonomnymy systemamy pozhezhohasinnia/ Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka. [Ensuring fire safety of power plants]. *Visnyk Universytetu tsyvilnoho zakhystu*, 3, 343-350 [in Ukrainian].
2. Góis, J. G. G. (2022). Autonomous Protection of Infrastructure Against Forest Fires (Master's thesis). [in English].
3. Ke Li , Chen Huang, Jiaping Liang and other. (2023). Research on Autonomous and Collaborative Deployment of Massive Mobile Base Stations in High-Rise Building Fire Field. DOI:10.20944/preprints202307.1962.v1. [in English].
4. Hamidovic, H., & CIA, I. (2014). Fire protection of computer rooms-legal obligations and best practices. *ISACA Journal*. № 4. P. 1-3. [in English].
5. DBN V.2.5-56:2014. Fire protection systems. [Effective from 2019-11-01]. Kind. officer Kyiv: Ministry of Regions of Ukraine, 2019. 102 p. [in Ukrainian].
6. NAPB V.01.053-2016/520. Rules of fire safety in the field of communication. [Effective from 2016-05-31]. Kind. officer Kyiv: Ministry of Regions of Ukraine, 2016. 57 p. [in Ukrainian].
7. SOU.KS-PR.B.RD-02:2014. Standard of the organization of Ukraine PRAT "Kyivstar". Description of processes. Construction of mobile cellular base stations, 2014. 29 p. [in Ukrainian].
8. DSTU 3987-2000. Fire hazard testing of electrical products. Part 2. Test methods. Section 4/0. Methods of flame tests of diffusion and premixed types (IEC 60695-2-4/0:1991). [Effective from 2001-07-01]. Kind. officer Kyiv: Ministry of Regions of Ukraine, 2000. 10 p. [in Ukrainian].
9. DSTU EN 60695-1-10:2018. Fire hazard testing. Part 1-10. Guidelines for assessing the fire hazard of electrical products. General methodological recommendations (EN 60695-1-10:2017, IDT; IEC 60695-1-10:2016, IDT). Kind. officer Kyiv: Ministry of Regions of Ukraine, 2018. 28 p. [in Ukrainian].

METHOD OF EXPERIMENTAL STUDIES OF FLAME SPREAD AND THE TEMPERATURE INFLUENCE OF FIRE IN THE ROOM OF A MOBILE COMMUNICATION BASE STATION

Yu. Feshchuk[1], A. Tsyhankov[1], V. Melnyk[1], O. Bedratiuk[1], K. Shevchenko[2]

[1]Institute of Scientific Research on Civil Protection of the National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine
[2]Bila Tserkva National Agrarian University, Ukraine

KEYWORDS

mobile communication base station, flame spread, temperature effect of fire, fire hazard assessment criteria, thermocouples

ABSTRACT

A problem was identified regarding the economic feasibility of equipping the premises of a mobile communications base station with automatic fire extinguishing systems from the point of view of equipment protection. A lack of consistency between the requirements of DBN V.2.5-56:2014 and NAPB V.01.053-2016/520 was established. The most fire-hazardous elements of the premises of a mobile communications base station were determined. Criteria for assessing the fire hazard of a mobile communications base station were developed, and a list of equipment necessary for conducting experimental studies was also formed. A thermocouple layout scheme was proposed that most accurately reflects the location of fire-hazardous elements, allows for real-time temperature control and to detect the possibility of ignition of one element due to the burning of another, and to establish the possibility of fire spreading beyond the premises of the mobile communications base station. A methodology is presented that makes it possible to verify the proposed criteria in order to study the spread of flame through the telecommunications and electrical equipment of a mobile communications base station and the temperature effect of a fire in the base station premises on the temperature of its external walls. The methodology presented in the work makes it possible to verify the proposed criteria in order to study the spread of flame through the telecommunications and electrical equipment of a mobile communications base station and the temperature effect of a fire in the base station premises on the temperature of its external walls. Based on the analysis of the regulatory framework, criteria for assessing the fire hazard of a mobile communications base station, as well as a list of equipment necessary for conducting experimental research, are proposed.

The data obtained using the developed methodology will be used to justify the feasibility of equipping the premises of a mobile communications base station with an automatic (autonomous) fire extinguishing system, in particular, in order to prevent the spread of fire beyond the boundaries of such premises.

УДК 614.844.4

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ФІЛЬТРІВ-ПОГЛИНАЧІВ У СИСТЕМАХ ОЧИЩЕННЯ ПОВІТРЯ ЗАХИСНИХ СПОРУД ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ

https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.1.(19).24-30

Бенедюк В. С.[1]*, ORCID iD 0000-0002-5109-5295
Борисов А. В.[2], ORCID iD 0000-0001-6858-0492
Володченко М. А.[1], ORCID iD 0009-0007-8551-755X
Зазимко О. В.[1], ORCID iD 0000-0001-7496-0248
Огурцов С. Ю.[1], ORCID iD 0000-0003-3224-9436
*E-mail: naanotek@ukr.net

[1]*Інститут наукових досліджень з цивільного захисту НУЦЗ України, Україна*
[2]*Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Україна*

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 25.09.2024
Пройшла рецензування: 03.10.2024

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

фільтр-поглинач, очищення повітря, захисні споруди, цивільний захист, фільтровентиляційна система, адсорбція, активоване вугілля, герметичність, аеродинамічний опір, модельні речовини, випробування, безпека населення.

АНОТАЦІЯ

У статті розглянуто актуальні аспекти оцінки ефективності фільтрів-поглиначів, що є ключовими елементами систем очищення повітря у захисних спорудах цивільного захисту. Одним із головних компонентів, що забезпечує життєдіяльність у захисному укритті, є фільтр-поглинач, завданням якого є видалення шкідливих домішок з повітря, що надходить у внутрішній простір споруди. У межах дослідження проаналізовано конструктивні типи фільтрів-поглиначів, які застосовуються в Україні, зокрема фільтри серії ФП, ФПУ, ФВК-3Ф, а також регенеративні патрони типу РП-100. Особливу увагу приділено сучасним ізраїльським фільтрам ARCONIK серії AFU, які демонструють високий ступінь очищення, простоту обслуговування та відповідність європейським стандартам. Наведено порівняльну таблицю технічних характеристик вказаних фільтрів, де враховано продуктивність, аеродинамічний опір, номінальні отвори та інші експлуатаційні показники. У роботі акцентовано увагу на основних технічних параметрах, які визначають ефективність фільтрів: аеродинамічний опір при номінальній витраті повітря, герметичність конструкції та здатність до адсорбції модельних речовин, таких як диметилметилфосфонат, хлорціан та толуол. Детально описано методики випробування, що використовуються для оцінки зазначених показників. Представлено 3D-моделі випробувальних установок, призначених для визначення опору, герметичності, здатності до адсорбції у фільтрі та у тестовій колоні з активованим вугіллям. Визначено, що згідно з вимогами ДСТУ 9077:2021 фільтри мають відповідати суворим технічним нормам, зокрема не перевищувати граничні значення опору та забезпечувати повну фільтрацію без прориву. Звертається увага на необхідність гармонізації національних нормативів із європейськими та на впровадження більш сучасних підходів до сертифікації й моніторингу якості повітря в умовах надзвичайних ситуацій. У висновках окреслено перспективні напрями подальших досліджень: впровадження новітніх сорбентів, адаптація мобільних систем контролю повітря, вдосконалення конструкцій фільтрів та модернізація наявної нормативно-технічної бази з урахуванням європейських практик.

Постановка проблеми У сучасних умовах зростаючої кількості надзвичайних ситуацій, пов'язаних як із техногенними катастрофами, так і з військовими діями, особливої актуальності набуває створення ефективної системи захисту населення.

Однією з найважливіших складових такої системи є захисні споруди цивільного захисту, які забезпечують безпечне перебування людей у разі хімічного, радіаційного або біологічного забруднення зовнішнього середовища.

Найважливішим компонентом життєзабезпечення у таких спорудах є система очищення повітря, в якій ключову роль відіграє фільтр-поглинач. Саме він забезпечує фільтрацію шкідливих речовин з повітря, що потрапляє до сховища, створюючи безпечні умови для перебування людей. Оцінка показників їх якості дозволяє не лише забезпечити належний рівень безпеки, а й оптимізувати ресурси, підвищити ефективність експлуатації захисних систем. У зв'язку з цим аналіз якісних характеристик фільтрів-поглиначів є надзвичайно актуальним для розробки та удосконалення заходів цивільного захисту в Україні.

Також слід зазначити, що вентиляційні системи в захисних спорудах цивільного захисту повинні забезпечувати роботу в трьох режимах згідно [1]:

Режим I - природна вентиляція (звичайний режим), застосовується в умовах відсутності загрози зараження повітря. Вентиляція здійснюється природним або примусовим способом без фільтрації повітря.

Режим II - фільтровентиляційний режим, застосовується при загрозі радіоактивного, хімічного або біологічного зараження повітря. Вентиляція здійснюється або примусовим способом із фільтрацією повітря. Робота вентиляції повинна забезпечуватися мінімум 12 годин.

Режим III - режим регенерації повітря (автономний режим), застосовується у надзвичайно небезпечних умовах, коли зовнішнє повітря неможливо використовувати навіть після фільтрації. Відбувається повна рециркуляція повітря всередині укриття. Проєктується на не менше 6 годин, часто 8 - 12 годин.

Фільтри-поглиначі призначені для очищення повітря від пилу, бойових отруйних, небезпечних хімічних, радіоактивних та біологічних речовин.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Функціональні та технічні показники фільтрі-поглиначів визначені у нормативних документах [2], [3]. Фільтри-поглиначі поділяються на кілька категорій залежно від їхнього функціонального призначення та типу шкідливих речовин, що підлягають нейтралізації. Найбільш поширені такі типи:

- **Фільтри ФВК-ЗФ** (фільтр-вентиляційний комплект захисного фонду) – комплексні системи очищення повітря від радіоактивного пилу, аерозолів, отруйних речовин та бактеріологічних агентів.
- **ФПУ** – універсальні поглиначі для тривалої експлуатації у системах ЦЗ.
- **Фільтри на основі активованого вугілля** – високоселективні поглиначі для газоподібних домішок (наприклад, фосгену, хлору, синильної кислоти).

Також для поглинання вуглекислого газу (CO_2), що видихається людьми в замкненому середовищі використовуються в системах очищення повітря захисних споруд цивільного захисту можуть застосовуватись регенеративні патрони.

Фільтр-поглинач працює за принципом адсорбції, хемосорбції та механічної фільтрації. Детальний опис захисної дії фільтра розкрито в статті [4].

Фільтри класифікують за:

- типом забруднень, які вони поглинають (газові, аерозольні, біологічні);
- призначенням (протигазові, протипилові, комбіновані);
- конструктивними особливостями (стаціонарні, змінні картриджі).

Формулювання цілей дослідження. Мета роботи полягає у вивченні технічних характеристик фільтрів-поглиначів, що використовуються у системах очищення повітря захисних споруд цивільного захисту, а також у визначенні ефективності їх роботи за ключовими показниками, зокрема опору повітряному потоку, герметичності, та здатності до адсорбції модельних

небезпечних речовин. Додатковою метою є порівняльний аналіз вітчизняних моделей фільтрів із зарубіжними аналогами типу ARCONIK AFU для обґрунтування доцільності модернізації систем фільтрації в Україні.

Для досягнення зазначеної мети були поставлені наступні завдання:

проаналізувати нормативно-технічну базу щодо вимог до фільтрів-поглиначів (зокрема, ДСТУ 9077:2021);

провести класифікацію фільтрів за типом дії, призначенням і конструктивними особливостями;

розглянути технічні характеристики типових зразків фільтрів серій ФП, ФПУ, РП та AFU;

розробити 3D-моделі випробувальних установок для визначення опору повітряному потоку, герметичності фільтрів і їхньої адсорбційної здатності;

визначити методику проведення кожного з типів випробувань згідно з вимогами стандарту та критеріями оцінки відповідності.

Методи дослідження. Включали:

аналітичний метод, що застосовувався для опрацювання нормативної документації та наукових джерел з метою систематизації вимог до фільтрів-поглиначів;

метод технічного моделювання, що передбачав створення 3D-моделей випробувальних установок для візуалізації процесів оцінки показників якості;

експериментальний метод (на етапі планування), з використанням модельних речовин (диметилметилфосфонату, толуолу, хлорціану) для визначення часу прориву і розрахунку адсорбційної ємності;

порівняльний метод, що дозволив провести співставлення вітчизняних і зарубіжних зразків фільтрів за ключовими параметрами: ефективністю фільтрації, опором, простотою обслуговування.

Виклад основого матеріалу. Аналіз типів фільтрів-поглиначів, які застосовуються в Україні показав, що альтернативними до фільтрів серії ФП на сьогоднішній день в Україні є високоефективні фільтри-поглиначі ARCONIK типу AFU. Фільтри підходять для заміни фільтрів-поглиначів типу ФП. Фільтри серії AFU компактні, довговічні і не потребують обслуговування. Вони складаються з механічного і хімічного елементів. Хімічний елемент представляє собою активоване вугілля з внутрішньою поверхнею не менше 880 м2/г (визначення за методом Б.Е.Т.) імпрегноване солями металів і триетілдіаміном.

Ефективність очищення механічним елементом фільтра-поглинача повинна становити не менше ніж 99,995% і визначатися згідно з [2], [5].

Здатність хімічного елементу до адсорбції газів і парів небезпечних речовин визначається у мг·хв/м^3 по таким тестовим речовинам: диметилметилфосфонат (ДДМФ), хлорціан (СК) та толуол [6]. Щодо фільтрів-поглиначів серії ФП то дані по вищезазначеним тестовим речовинам невідомі. Серія фільтрів ФП тестується за здатністю до поглинання хлорпікрину. В статті [7] детально розкрито час захисної дії від небезпечних хімічних речовин в інтервалі заданих концентрацій.

В таблиці 1 наведені розповсюджені типи фільтрів та їх технічні характеристики.

Таблиця 1 – Типи фільтрів та їх технічні характеристики

Назва фільтра	Продуктивність, м³/год	Опір, Па	Номінальний отвір, мм	Особливості використання
ФП-100	100	до 589	100	Для невеликих споруд, стаціонарний
ФПУ-200	200	до 1177	120	Широко використовується, універсальний
ФП-300	300	до 1177	120	Для великих обсягів повітря
РП-100	100	до 300	100	Поглинає CO_2 , регенеративний патрон
AFU 100	100	180	100	SAFE 360, до 6 осіб, ручний режим
AFU 180	180	500	200	Підлогове встановлення
AFU 240	240	500	200	Підлогове встановлення
AFU 300	300	500	200	Підлогове встановлення
AFU 450	450	500	200	Підлогове встановлення
AFU 600	600	500	200	Підлогове встановлення
AFU 900	900	500	200	Підлогове встановлення
AFU 1200	1200	1000	200	Підлогове встановлення
AFU 1800	1800	1000	200	Підлогове встановлення

Загальні технічні вимоги до фільтрів-поглиначів визначено в ДСТУ 9077, який відносно недавно набув чинності з 01.12.2021 року.

Стандарт встановлює обов'язкові вимоги до фільтрів-поглиначів, які використовуються в системах вентиляції захисних споруд. Ці вимоги охоплюють як механічні, так і хімічні елементи фільтрів.

З метою перевірки показників якості фільтрів в Інституті проводяться роботи з створення випробувального обладнання для визначення таких показників:

- опір повітря та номінальної витрати повітря засобів очищення повітря;
- герметичність засобів очищення повітря;
- здатність до адсорбції активованим вугіллям модельних речовин у тестовій колоні;
- здатність до адсорбції модельних речовин у фільтрі.

За критеріями оцінки відповідності визначення опору за номінальної витрати повітря повинен забезпечувати згідно з технічною документацією на засіб.

На рисунку 1 наведена 3D модель випробувальної установки для визначення опору за номінальної витрати повітря наведено.

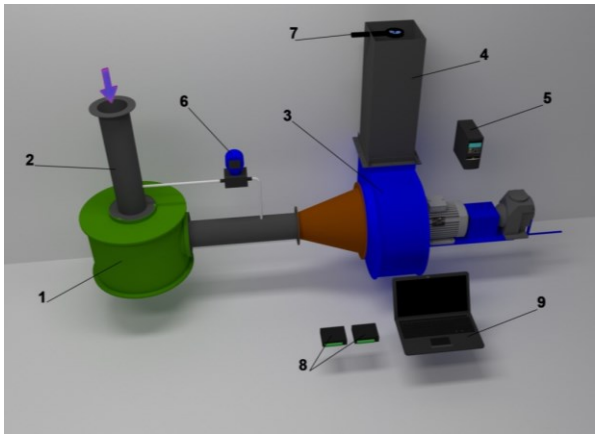


Рисунок 1 – Визначення опору за номінальної витрати повітря
1 – фільтр-поглинач; 2 – вхідний повітропровід; 3 – з'єднувальний повітропровід;
4 – вихідний повітропровід; 5 – регулятор обертів двигуна (частотний перетворювач); 6 – диференційний манометр; 7 – анемометр; 8 – реєстратор даних; 9 – ноутбук із програмним забезпеченням

Суть методу випробування полягає у вимірюванні різниці тиску на вході і виході із засобів очищення повітря у разі проходження крізь нього постійного потоку повітря із заданою номінальною витратою.

На рисунку 2 наведена 3D модель випробувальної установки щодо

визначення герметичності фільтрів-поглиначів.

Критерій оцінки відповідності щодо визначення герметичності фільтрів-поглиначів базується на створенні надлишкового тиску 1 кПа, допустиме падіння тиску протягом 1 хв не більше 10 Па. Фільтр монтується до повітряного колектору. На вхід подається за допомогою компресора контрольований об'єм повітря під надлишковим тиском. За допомогою диференційного манометра вимірюють різницю тисків. Проводиться розрахунок ступеня негерметичності як відсоток від загального потоку.

Такий підхід дозволяє виявити навіть мікроскопічні витоки й гарантувати, що повітря, яке надходить до захисного середовища, проходить через повноцінне очищення.

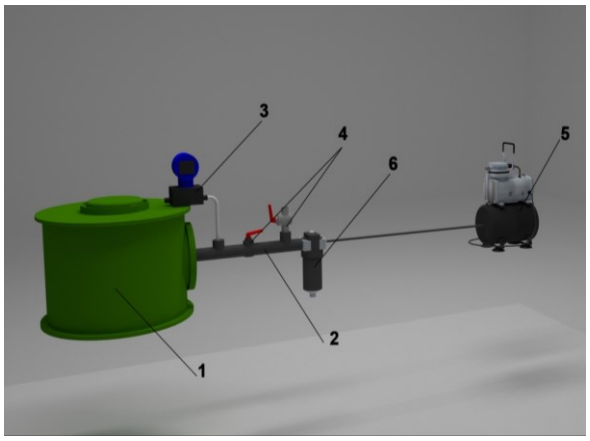


Рисунок 2 – Визначення герметичності фільтрів-поглиначів
1 – фільтр-поглинач; 2 – колектор; 3 – диференційний манометр; 4 – крани; 5 – компресор; 6 – фільтр вологи.

Основним показником якості визначення здатності до адсорбції модельних речовин є час прориву – момент, коли концентрація речовини за шаром адсорбенту перевищує 5% від вхідної.

На рисунку 2 наведена 3D модель випробувальної установки з визначення здатності до адсорбції модельних речовин.

Для імітації бойових або промислових забруднювачів використовують хімічні аналоги, диметилметилфосфонат (ДММФ), толуол, ацетон.

Фільтр встановлюється у випробувальну установку, через який за допомогою компресора подається повітря із заданої концентрацією модельної речовини. За допомогою індикатора розчину контролюється проскок тестової речовини за фільтром. Час до появи прориву фіксується, і на основі цього обчислюється адсорбційна ємність (в мг·хв/м³).

Здатність до адсорбції активованим вугіллям модельних речовин у тестовій колоні визначається за принципом вищезазначеного методу, тільки замість фільтра використовується тестова колона в яку засипається активоване вугілля.

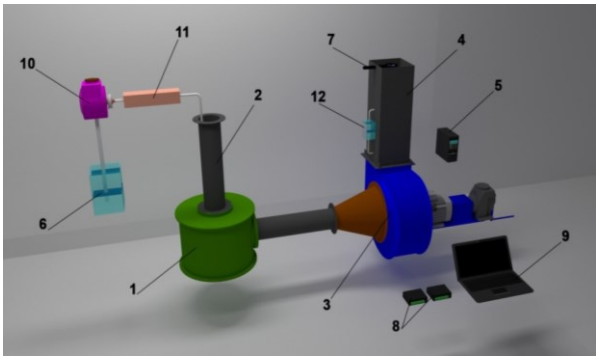


Рисунок 3 - Схема щодо визначеності до адсорбції модельних речовин

1 – фільтр-поглинач; 2 – вхідний повітропровід; 3 – з'єднувальний повітропровід та вентилятор; 4 – вихідний повітропровід; 5 – регулятор обертів двигуна (частотний перетворювач); 6 – ємність з тестовою речовиною; 7 – анемометр; 8 – реєстратор даних; 9 – ноутбук із програмним забезпеченням; 10 – перистальтичний насос; 11 – нагрівач; 12 – ємність з індикатором розчину

Типова схема адсорбції активованим вугіллям модельних речовин у тестовій колоні зображена на рисунку 4.

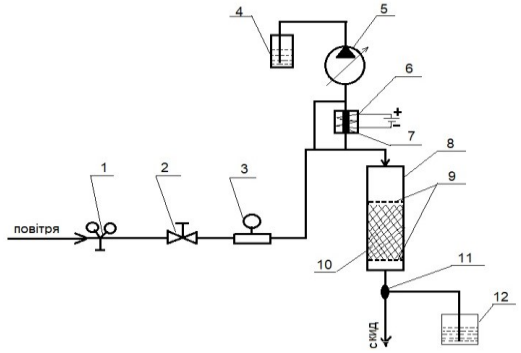


Рисунок 4 – Типова схема здатності до адсорбції активованим вугіллям модельних речовин у тестовій колоні

1– редуктор повітряний; 2 – вентиль тонкого регулювання; 3 – лічильник газу мастермальний; 4 – ємність з модельною речовиною; 5 – перистальтичний насос; 6 – електричний нагрівач; 7 – сопло двохконтурне; 8 – адсорбційна колонка; 9 – решітки; 10 – адсорбент; 11 – дільник потоку;12 – склянка з індикатором розчину.

Висновки та напрями подальших досліджень. У статті розглянуто ключову роль фільтрів-поглиначів як основного елементу системи очищення повітря у захисних спорудах цивільного захисту. Аналіз сучасних типів фільтрів, зокрема вітчизняних моделей серії ФП та високоефективних фільтрів ARCONIK серії AFU, дозволив зробити висновок, що технічні характеристики зарубіжних зразків часто перевищують національні аналоги за низкою показників: опір повітряному потоку, ефективність механічної фільтрації, адсорбційна здатність та простота експлуатації.

Наголошено на важливості відповідності фільтрів нормативним вимогам, що регламентує технічні характеристики, методи випробувань і критерії оцінки відповідності. Наведено результати моделювання випробувань на герметичність, опір та адсорбцію, які свідчать про необхідність постійного технічного контролю й модернізації існуючих фільтраційних систем.

Встановлено, що ефективність системи очищення повітря залежить не лише від конструкції фільтра, а й від якості сорбентів, зокрема активованого вугілля, яке використовується як в окремих патронах, так і в тестових колонах.

Заплановано розроблення зазначених випробувальних установок, розроблення необхідної технічної документації на них. Проведення верифікації та тестових випробувань.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.2.2-5:2023. Захисні споруди цивільного захисту. Київ, 2023.
2. ДСТУ 9077:2021. Засоби очищення повітря захисних споруд цивільного захисту. Київ, 2021.
3. СОУ МНС 75.2-00013528-004:2010. Безпека у надзвичайних ситуаціях. Засоби очищення повітря захисних споруд цивільного захисту. Класифікація і загальні технічні вимоги. Київ, 2010.
4. Kovalenko, V., Borysova, A., Pliuta, I., & Likhnovsky, R. (2018). Адсорбція як основа захисної дії фільтрів-поглиначів. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека, 2(6), 59–63. https://doi.org/10.33269/nvcz.2018.2.59-63 (дата звернення: 25.04.2025).
5. ДСТУ EN 1822-1:2019. Фільтри повітряні високоефективні. Класифікація, випробування експлуатаційних характеристик, маркування. Київ, 2019.
6. Стандарт Ізраїлю 4570. Система вентиляції та фільтрації повітря у бомбосховищах (захисних спорудах): фільтри. Тель-Авів: Інститут стандартів Ізраїлю, 2010.
7. Kovalenko, V., Borysova, A., Kravchenko, V., & Likhnovskyi, R. (2019). Нормативно-технічні аспекти захисної дії фільтрів-поглиначів, що застосовуються для колективного захисту. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека, 2(8), 50–56. https://doi.org/10.33269/nvcz.2019.2.50-56 (дата звернення: 25.04.2025).
8. Кодекс цивільного захисту України: Закон України від 02.10.2012 № 5403-VI. Відомості Верховної Ради України, 2013, № 34–35, ст. 458.

REFERENCES

1. DBN V.2.2-5:2023. (2023). *Zakhysni sporudy tsyvilnoho zakhystu* [Protective structures of civil protection]. Kyiv: Ministerstvo rozvytku hromad ta terytorii Ukrainy.
2. DSTU 9077:2021. (2021). *Zasoby ochyshchennia povitria zakhysnykh sporud tsyvilnoho zakhystu* [Air purification devices for civil protection shelters]. Kyiv: DP “UkrNDNTs”.
3. SOU MNS 75.2-00013528-004:2010. (2010). *Bezpeka u nadzvychainykh sytuatsiiakh. Zasoby ochyshchennia povitria zakhysnykh sporud tsyvilnoho zakhystu. Klasyfikatsiia i zahalni tekhnichni vymohy* [Safety in emergencies. Air purification means of civil protection shelters. Classification and general technical requirements]. Kyiv: MNS Ukrainy.

4. Kovalenko, V., Borysova, A., Pliuta, I., & Likhnovsky, R. (2018). Adsorbtsiia yak osnova zakhysnoi dii filtriv-pohlynachiv [Adsorption as a basis of the protective action of absorber filters]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, (2), 59–63. https://doi.org/10.33269/nvcz.2018.2.59-63
5. DSTU EN 1822-1:2019. (2019). *Filtry povitriani vysokoeffektyvni. Klasyfikatsiia, vyprobuvannia ekspluatatsiinykh kharakterystyk, markuvannia* [High-efficiency air filters. Classification, performance testing, labeling]. Kyiv: DP "UkrNDNTs".
6. Israel Standard 4570. (n.d.). *Systema ventyliatsii ta filtratsii povitria u bomboskhovyshchakh (zakhysnykh sporudakh): filtry* [Air ventilation and filtration systems in bomb shelters (protective structures): filters]. Tel Aviv: The Standards Institution of Israel.
7. Kovalenko, V., Borysova, A., Kravchenko, V., & Likhnovskyi, R. (2019). Normatyvno-tekhnichni aspekty zakhysnoi dii filtriv-pohlynachiv, shcho zastosovuiutsia dlia kolektyvnoho zakhystu [Normative and technical aspects of the protective action of absorber filters used for collective protection]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, (2), 50–56. https://doi.org/10.33269/nvcz.2019.2.50-56
8. Kodeks tsyvilnoho zakhystu Ukrainy No. 5403-VI. (2012, October 2). *Zakon Ukrainy "Pro tsyvilnyi zakhyst"* [Civil Protection Code of Ukraine]. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text

EEVALUATION OF THE EFFICIENCY OF ABSORBER FILTERS IN AIR PURIFICATION SYSTEMS OF CIVIL DEFENSE FACILITIES

V. Benediuk[1], A. Borysov[2], M. Volodchenko[1], O. Zazymko[1], S. Ohurtsov[1]

[1]Institute of Scientific Research on Civil Protection of the National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine
[2]Institute of Public Administration and Research in Civil Protection, Ukraine

KEYWORDS

air-purifying filter, air purification, protective shelters, civil protection, filtration and ventilation system, adsorption, activated carbon, airtightness, aerodynamic resistance, model substances, testing, population safety

ABSTRACT

The article discusses current aspects of assessing the effectiveness of filter absorbers, which are key elements of air purification systems in civil defense shelters. One of the main components that ensures life support in a protective shelter is an absorption filter, whose task is to remove harmful impurities from the air entering the interior of the structure. The study analyzes the design types of filter absorbers used in Ukraine, in particular the FP, FPU, and FVK-ZF series filters, as well as RP-100 type regenerative cartridges. Particular attention is paid to modern Israeli ARCONIK AFU series filters, which demonstrate a high degree of purification, ease of maintenance, and compliance with European standards. A comparative table of the technical characteristics of these filters is provided, taking into account performance, aerodynamic resistance, nominal openings, and other operational indicators. The paper focuses on the main technical parameters that determine the efficiency of filters: aerodynamic resistance at nominal air flow, structural tightness, and the ability to adsorb model substances such as dimethyl methylphosphonate, chlorine cyanide, and toluene. The testing methods used to evaluate these parameters are described in detail. 3D models of test rigs designed to determine resistance, tightness, and adsorption capacity in a filter and in a test column with activated carbon are presented. It has been determined that, in accordance with the requirements of DSTU 9077:2021, filters must comply with strict technical standards, in particular, they must not exceed the resistance limit values and must ensure complete filtration without breakthrough. Attention is drawn to the need to harmonize national standards with European ones and to introduce more modern approaches to certification and monitoring of air quality in emergency situations. The conclusions outline promising areas for further research: the introduction of the latest sorbents, the adaptation of mobile air control systems, the improvement of filter designs, and the modernization of the existing regulatory and technical framework, taking into account European practices.

УДК 614.843

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ОБМЕЖЕННЯ ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ ЗЗОВНІ БУДІВЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ГАЗО-ГІДРОДИНАМІКИ

https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.1.(19).31-43

Балло Я. В., ORCID iD 0000-0002-9044-1293
Ковалишин Б. М., ORCID iD 0000-0001-6433-8826
*E-mail: 2801397@ukr.net

Інститут наукових досліджень з цивільного захисту НУЦЗ України, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 07.03.2025
Пройшла рецензування: 20.04.2025

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

поширення зовнішньої пожежі, протипожежні карнизи, фасадні протипожежні перешкоди, пожежна безпека, небезпечні чинники пожежі

АНОТАЦІЯ

В роботі досліджено питання впливу конструктивних параметрів протипожежних карнизів на процеси обмеження поширення пожежі ззовні фасаду з використанням газо-гідродинамічної моделі. Описано методологію проведення досліджень, а також вихідні параметри, які застосовуються під час створення комп'ютерної моделі фрагменту фасаду та досліджуваних типів фасадних протипожежних перешкод. Проведено аналітичний огляд попередніх наукових робіт щодо дослідження основних критеріїв, які характеризують небезпеку поширення пожежі на вище розташовані поверхи будівлі, а також найбільш небезпечні сценарії виникнення та розвитку пожежі. Сформовано та описано основні етапи програми експериментальних досліджень процесів поширення пожежі ззовні фасаду з використанням методу обчислювальної газо-гідродинаміки. Наведено план експерименту, послідовність етапів дослідження, характеристики комп’ютерної моделі, а також конструктивні параметри відтвореної моделі установки для прогнозування поширення пожежі по фасадам будівель. Обґрунтовано параметри навколишнього середовища та тривалість проведення кожного етапу комп’ютерного моделювання. Досліджено відносну ефективність для карнизу типу «вінглет» для ширини 0,3 м; 0,5 м; 0,75м; 1,0 м; 1,25 м та 1,5 м, зокрема за показниками максимальної площі критичного прогріву фасаду, середньої швидкості висхідного потоку та значення тиску в зоні фасаду. Встановлено, що протипожежний карниз у формі «вінглету» при його ширині 0,3 м недоцільно використовувати для захисту фасаду на межі вертикальних протипожежних відсіків Систематизація отриманих даних дозволила оцінити вплив конструктивних параметрів протипожежних карнизів на динаміку процесів, щодо обмеження поширення небезпечних чинників пожежі на вище розташовані поверхи. Окрім цього, отримані дані дозволять більш ефективно застосовувати протипожежні карнизи для захисту різних функціональних зон будівлі.

Постановка проблеми. Дослідження процесів поширення зовнішньої пожежі та виявлення закономірностей, які впливають на її ефективне обмеження є одним із пріоритетних питань забезпечення пожежної безпеки будівель та споруд. Попередні дослідження демонструють, що ширина та форма протипожежного карнизу можуть суттєво впливати на процеси обмеження її поширення на вище розташовані поверхи [1-3]. Результати представлені в роботі [4] відзначають, що процеси вертикального поширення вогню по зовнішній стороні фасаду є одним із найскладніших видів поширення пожежі, який залежить від багатьох чинників, які часто важко поєднати між собою. Окрім цього, архітектурна складова конструкції вузлів фасадних систем, ще більше ускладнює потенційну оцінку наслідків від пожежної небезпеки. В роботі [5] за результатом натурних вогневих досліджень отримано дані, які дали змогу продемонструвати відносну ефективність фасадного протипожежного карниза у

формі «вінглет» щодо зменшення площі критичного прогріву фрагмента вертикального фасаду порівняно зі стандартним протипожежним карнизом прямої форми. При цьому, виявлено залежності, які полягають у тому, що протипожежний карниз у формі «вінглет» з мінімальною нормативною шириною виступу в 0,3 м дає змогу зменшити площу критичного прогріву досліджуваного фрагменту фасаду порівняно із стандартним протипожежним карнизом прямої форми з аналогічною шириною до 20–25% від усієї площі фасаду. Разом із цим, постало питання дослідження впливу більш широкого спектру конструктивних характеристик протипожежних карнизів, щодо процесу обмеження поширення пожежі ззовні фасаду, а саме дослідити ефективність обмеження пожежі при наявності протипожежних карнизів шириною від 0,3 м до 1,5 м. Зазначені залежності вирішено дослідити за допомогою обчислювальної газо-гідродинаміки із застосуванням верифікованої комп'ютерної моделі, яка відтворює параметри та умови роботи установки для прогнозування поширення пожежі по фасадам будівель. Отримані дані дозволять, на основі визначених критеріїв безпеки, визначити відносну ефективність кожного типу досліджуваного карнизу, а також дозволить визначити їх переваги та недоліки при застосуванні для певних функціональних зон фасаду будівлі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Аналіз наукової робіти [6] демонструє, що основними напрямками забезпечення обмеження поширення пожеж, а також їх ліквідації на початковій стадії їх виникнення є:

- удосконалення систем протипожежного захисту та систем автоматичного пожежогасіння;
- дослідження умов безпечного використання будівельних матеріалів, в тому числі облицювальних, із різними показниками пожежної небезпеки (горючість, здатність поширювати полум'я, температура займання тощо);
- вплив архітектурних та геометричних параметрів фасадів будівель на процеси поширення пожежі;
- застосування вогнестійких заповнень світлових прорізів;
- використання протипожежних фасадних перешкод (протипожежних карнизів, бар'єрів, поясів, штор тощо) для обмеження потенційної зони можливої пожежі.

Окремим питанням наукових досліджень пожежної безпеки фасадів будівель є визначення правильних та найбільш ймовірних сценаріїв пожежі під час проведення математичних розрахунків, імітаційних натурних вогневих досліджень та комп'ютерного моделювання [7].

Дослідження представлені в роботі [4] відзначають, що процеси поширення вогню по зовнішній стороні фасаду є мало дослідженими та залежить від багатьох супутніх чинників, які впливають на кінцевий результат оцінювання характеру поширення пожежі. Також відзначається, що сучасні тенденції в будівництві в частині скорочення використання енергій та збереження тепла призвели до збільшення використання горючих ізоляційних матеріалів та матеріалів утеплення фасаду. Як приклад, пінопласт один з перших синтетичних полімерів, який масово використовується для теплоізоляції будівель. Він має чудові адгезійні властивості, високу хімічну стабільність та невисоку собівартість виробництва та монтажу. Разом із тим, використання неякісних утеплювачів на його основі стали однією із основних причин стрімкого збільшення кількості фасадних пожеж у висотних будівлях та призвели в ряді випадків до масштабних втрат, а інколи і до загибелі людей.

В роботі [8] представлено критичний огляд чинних будівельних стандартів та будівельних норм, які стосуються інтеграції енергоефективних систем в структуру фасадних конструкцій. Аналіз проектів демонструє, що, як приклад інтегровані фотоелектричні системи

(BIPV) призначені для функції збору сонячної енергії, значно збільшують пожежне навантаження в конструкції фасадів і тільки за 2012-2013 роки призвели до 430 пожеж у будівлях в Німеччині. Окрім цього, пожежі таких сонячних модулів можуть мати непередбачуваний розвиток та поширення, оскільки фотоелектричні модулі можуть небезпечно реагувати на воду подану на гасіння пожежі, спричинити ураження електричним струмом та супроводжуватися викидом токсичних газів. При цьому, сама наявність панелей на поверхні фасаду негативно впливає на забезпечення доступу для пожежно-рятувальних підрозділів до внутрішній шарів конструкції фасадних систем та ускладнює процес гасіння.

В роботі [9] досліджуються проблеми використання нових видів оздоблювальних матеріалів та недосконалості окремих технологій будівництва, зокрема при використанні світлопрозорих конструкцій для заповнення світлових прорізів великих розмірів. Однією із проблем є застосування металевих матеріалів кріплення, які мають крихку структуру та легко деформуються при невисоких температурах або при різкій зміні їх діапазону. Як приклад, алюмінієві панелі кріплення таких скло прозорих конструкцій під час пожежі вже при температурі в 350 ^{o}C можуть легко деформуватися і в подальшому повністю руйнуватися під значною вагою скляних панелей. Руйнування таких конструкцій є не просто небезпечним і може призвести до прогресивного руйнування конструкції фасаду, але і створює загрозу для людей, які евакуюються з будівлі та для пожежно-рятувальних підрозділів, які проводять рятувальні роботи. Аналогічна проблема стосується кріпильних елементів (болтів, ригелів, монтажних пластин), які під час проведення сертифікаційних вогневих випробувань не знаходяться в напруженому стані, а відповідно прогнозувати їх міцність та вогнестійкість під час пожежі фактично не можливо. В даному випадку автори пропонують удосконалити методичні підходи під час проведення сертифікаційних випробувань конструкцій фасадів.

Подібна ситуація залишається із систематизацією та приведенням до єдиних підходів вимог, які висуваються до проектування протипожежних карнизів. В роботах [10-11] детально розкриваються проблеми застосування фасадних протипожежних перешкод різних типів, а також наведено оцінку їх впливу на процеси обмеження поширення зовнішньої пожежі. Разом із цим, на сьогоднішній день в світі відсутні єдині підходи, які дозволяють оцінити небезпеку можливості поширення зовнішньої пожежі вертикально вверх по фасаду, відповідне випробувальне обладнання та нормативно-технічне регулювання випадків їх застосування, з врахуванням параметричного методу будівництва. При цьому слід розуміти, що конструктивні параметри протипожежних карнизів, зокрема форма їх виступу, може значно впливати на ефективність захисту різних функціональних зон будівлі, з врахуванням конструктивного та архітектурного виконання фасадних систем. Таким чином, дослідження та розкриття закономірностей впливу конструктивних параметрів протипожежних карнизів на процеси запобігання поширення пожежі ззовні будівлі на вище розташовані поверхи та функціональні частини будівлі є актуальною науковою задачею.

Формулювання цілей досліджень. Мета роботи полягає в дослідженні закономірностей впливу форми протипожежних карнизів на ефективність запобігання поширення пожежі ззовні фасадів будівель.

Для досягнення визначеної мети слід:

- здійснити формування програми досліджень поширення пожежі з використанням методу обчислювальної газо-гідродинаміки;
- створити комп’ютерну модель фрагменту фасаду та визначених моделей протипожежних карнизів згідно з

методикою прогнозування поширення пожежі по фасаду будівлі;

- провести моделювання процесів поширення пожежі ззовні фасаду обладнаного протипожежними карнизами визначених типів;

- здійснити аналіз отриманих результатів та узагальнити дані щодо відносної ефективності досліджуваних протипожежних карнизів згідно визначених критеріїв.

Методи дослідження. Під час проведення досліджень використано методи узагальнення даних попередніх досліджень з оцінки ефективності запобігання поширення пожежі ззовні фасадів будівель. Методи комп'ютерного моделювання розвитку пожежі у фрагменті будинку. Метод обчислювальної газо-гідродинааміки та процесів теплообміну між факелом пожежі суміжними об’єктами.

Виклад основного матеріалу.

Враховуючи, що комп’ютерна модель передбачає максимальне врахування всіх основних чинників, які впливають на процеси поширення зовнішньої пожежі, створена газо-гідродинамічна модель передбачала врахування фізичних характеристик матеріалів конструкцій, які в ній відтворювалися. В основі конструкції моделі фрагменту будівлі використовувалася повнотіла клінкерна цегла густиною 1890 кг/м^3, питома теплоємність 0,82 кДж/(кг·К) та теплопровідністю 0,64 Вт/(м·К). В якості конструкції заповнення світлових прорізів використано полімерні рами із густиною 1230 кг/м^3 , питома теплоємність 0,67 кДж/(кг·К) та теплопровідністю 0,23 Вт/(м·К) та скло густиною 2570 кг/м^3, з питомою теплоємністю 0,68 кДж/(кг·К) та теплопровідністю 0,063 Вт/(м·К). На рисунку 1 наведено її зовнішній вигляд.

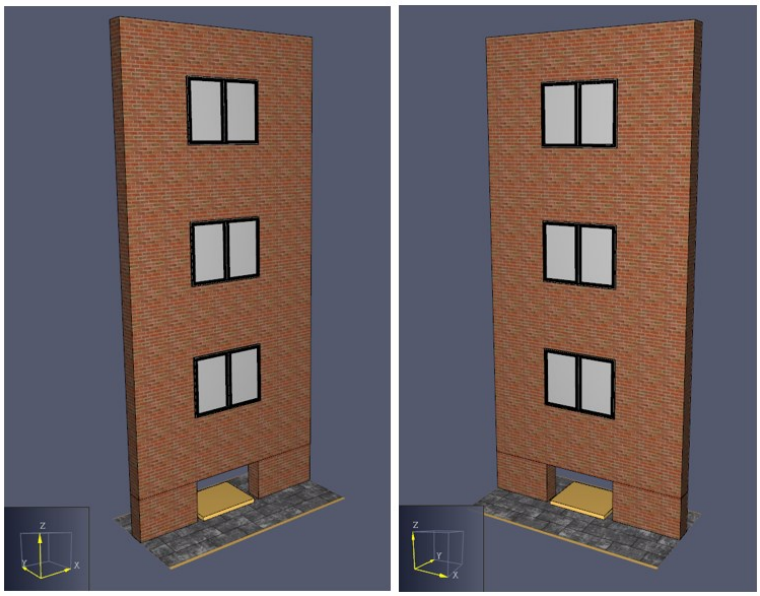


Рисунок 1 – Загальний вигляд моделі фрагменту фасаду для дослідження процесів обмеження поширення пожежі ззовні будівлі

В якості критерію, яких характеризує небезпеку поширення пожежі ззовні фасаду прийнято значення температури у 260 °С, що відповідає температурі деформування основного матеріалу з найменшим температурним опором, а саме конструкції вікон згідно з [12]. Базова модель фасаду не передбачає влаштування будь якого з типів протипожежного карнизу в зоні перекриття між поверхами. Отримані дані під час пікових значень температурного режиму у вогневій камері для фасаду, який не захищено карнизом є відносними диктуючими даними щодо площі критичного прогріву, швидкості висхідного теплового потоку, як елемент

конвекційної складової, значення тиску в зоні фасаду та значення температури в досліджуваній зоні. Ці диктуючі дані порівнюються з усіма наступними даними, які будуть отримані в результаті обладнання фасаду протипожежними карнизами досліджуваних типів.

Під час проведення моделювання та дослідження відносної ефективності для досліджуваного карнизу типу «вінглет», розрахунки проводилися для ширини 0,3 м; 0,5 м; 0,75м; 1,0 м; 1,25 м та 1,5 м. Тривалість проведення моделювання для кожного досліджуваного типу карнизу складала не менше 30 хвилин, що відповідає максимальному значенню межі вогнестійкості для зовнішньої стіни у будівлі I ступеню вогнестійкості, згідно з вимогами [13]. Окрім цього, дана тривалість досліджень також задовольняє критерій, що висувається до нормативного часу прибуття пожежно-рятувальних підрозділів у місті. Також, під час проведення моделювання, враховувалася наявність бокового вітру в межах до 5-6 м/с, що згідно досліджень [14-15] характерний для фасадів будівель, які розміщені на висоті в межах 40-100 м.

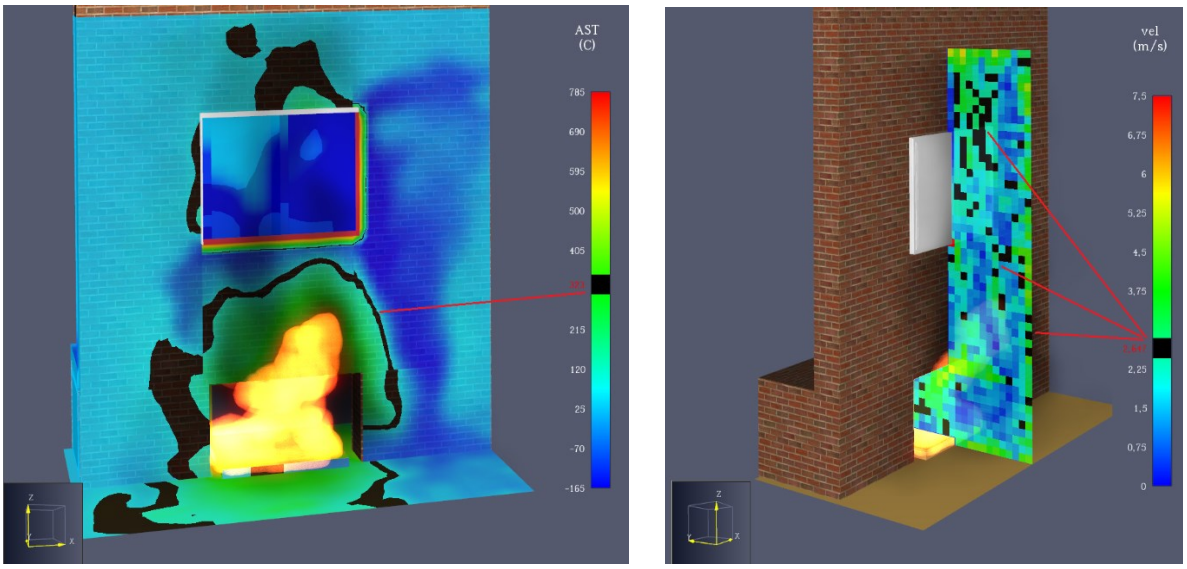
Дослідження для розв'язання визначених задач даної методики здійснюються за умови відсутності впливу атмосферних опадів та з наступними умовами навколишнього середовища:

– температура повітря від 30 ^{o}C;
– атмосферний тиск від до 90 кПа;
– відносна вологість повітря 50%;
– швидкість вітру 0 м/с та 5 м/с (два окремих дослідження для кожної умови).

В якості вогнища пожежі використовуватиметься макетне вогнище пожежі прямокутної форми розмірами 1м × 1м. при цьому пожежна навантага якого складає 780 МДж/м^2, а в основі матеріалу горіння використано рідке паливо (дизель). У продовж усієї тривалості проведення розрахункових дій робота систем автоматичного пожежогасіння або систем димовидалення не враховувалася, і пожежа вільно розвивалася у продовж всієї процедури проведення дослідження. Для забезпечення можливості оцінювання динаміки зміни отриманих даних на поверхні моделі фрагменту фасаду, забезпечено властивість анімованої поверхні фасаду в межах визначених критеріїв оцінки. Отримані результати моделювання дозволять зробити висновки щодо виявлених закономірностей поширення пожежі в залежності від типу встановлених фасадних протипожежних перешкод.

На першому етапі створено комп'ютерну імітаційну модель фасаду та первинного осередку виникнення пожежі відтворено фасад без протипожежних фасадних перешкод, що має три повноцінних поверхи з висотою кожного 2,7 м, а також вогневу камеру, що є частиною поверху, де моделюється пожежа. Всі визначені етапи моделювання проводяться згідно із методикою експериментальних вогневих досліджень з дослідження впливу джерела теплового випромінювання на фасадні системи на та процеси поширення пожежі у продовж всієї визначеної тривалості, а саме 30 хв.

За результатом моделювання встановлено, що фактична площа критичного прогріву на зовнішній поверхні фасаду склала 7,8 м^2 (±0,2м^2), при цьому максимальне значення температури в зоні його поверхні становило 473 ^{o}C. Максимальне значення температури у вогневій камері склало 915 ^{o}C, що наведено на рисунку 2 (а). Висота зони критичного прогріву зовнішньої сторони фасаду (вище 260 ^{o}C) спостерігається по всій висоті досліджуваного фрагменту конструкції фасаду та складало до 6,5 м. Отримані візуалізації швидкості висхідного теплового потоку для базової моделі фасаду свідчать про значні турбулентні процеси, які відбуваються в зоні фасаду, при цьому, при середніх значеннях швидкості висхідного потоку складали в межах 2,2-2,6 м/с полум'я не відводилося від площини фрагменту фасаду, що позначено чорними крапками на рисунку 2 (б).



(а) (б)

Рисунок 2 – Візуалізація отриманих результатів моделювання, де (а) - Температурні розподіли на поверхні фасаду який не обладнано протипожежним карнизом при значенні пожежної навантаги 780 МДж/м^2; (б) - візуалізація швидкості висхідного теплового потоку

Окрім цього, зважаючи, що основним чинником, який впливає на процеси вертикального поширення пожежі та утворення ефекту повторного приєднання полум'я до фасаду будівель є значення тиску в зоні фасаду, під час проведення моделювання визначено його середнє значення в межах 20 Па (±2,0 Па), а візуалізація динаміки його розподілу приведено на рисунку 3.

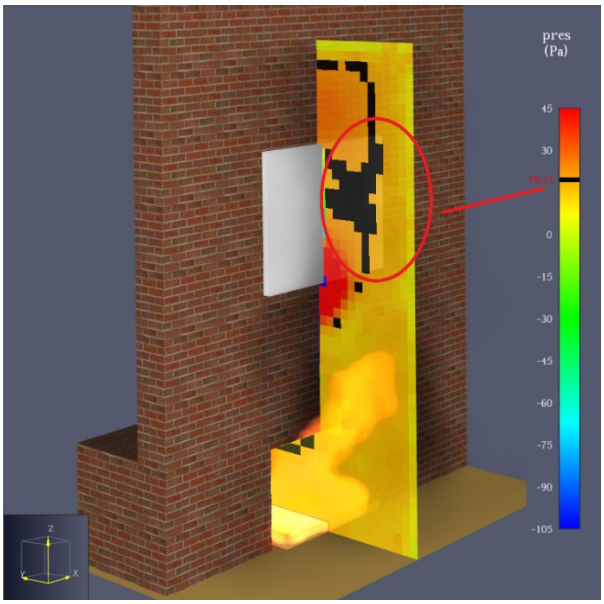


Рисунок 3 – Візуалізація розподілу тиску в зоні фасаду для базової моделі фрагменту будівлі

Таким чином, за результатом проведеного етапу моделювання на основі базової моделі фрагменту фасаду встановлено наступні дані, які характеризують процеси поширення пожежі на вище розташовані поверхи, що зведені до таблиці 1.

Таблиця 1 – Дані, що характеризують процеси поширення пожежі на вище розташовані поверхи для фасаду не обладнаного протипожежним карнизом

Тип протипожежного карнизу	Ширина карнизу, м	Максимальне значення температури зафіксоване в зоні фасаду °С	Площа критичного прогріву, % (±5%)	Висота зони критичного значення температури, м (±0,2 м)	Середня швидкість висхідного потоку, м/с (±0,3 м/с)	Значення тиску в зоні фасаду, Па (±10%)
		При впливі бокового вітру 5 м/с				
Фасад без карнизу	відсутній	473	73	6,5	2,4	20

Отримані дані приведені в таблиці 1 є основою для порівняння аналогічного чисельного експерименту але при застосуванні протипожежного карнизу типу «вінглет» з визначеною шириною виступу. Тобто, наступні отримані експериментальні дані для досліджуваних типів протипожежних карнизів можливо порівнювати з приведеними в таблиці 3.1 для визначення відносної ефективності обмеження поширення пожежі за кожним із приведених критеріїв. Таким чином, на даному етапі експериментальних досліджень було розроблено модель протипожежного карнизу з формою «вінглету», який виступає на ширину 0,3 м, 0,5 м, 0, 75 м, 1,0 м, 1,25 м та 1,5 м. Оцінювання ефективності обмеження поширення зовнішньої пожежі при значенні її пожежної навантаги в 780 МДж/м^2 в середині приміщення відбувалося за визначеною методикою. Геометричні параметри карнизу складали - товщина карнизу в основі його кріплення біля зони фасаду склала 0,4 м, кут виступаючої частини 15^o, кут заокругленої частини 35^o На рисунку 4 наведено візуалізацію створеної моделі досліджуваних типів протипожежного карнизу.

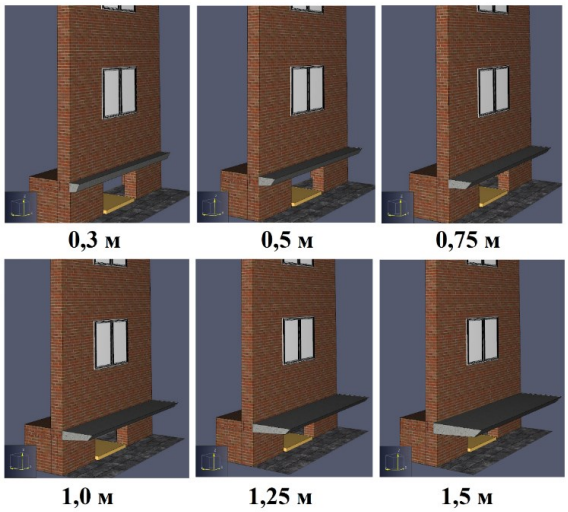
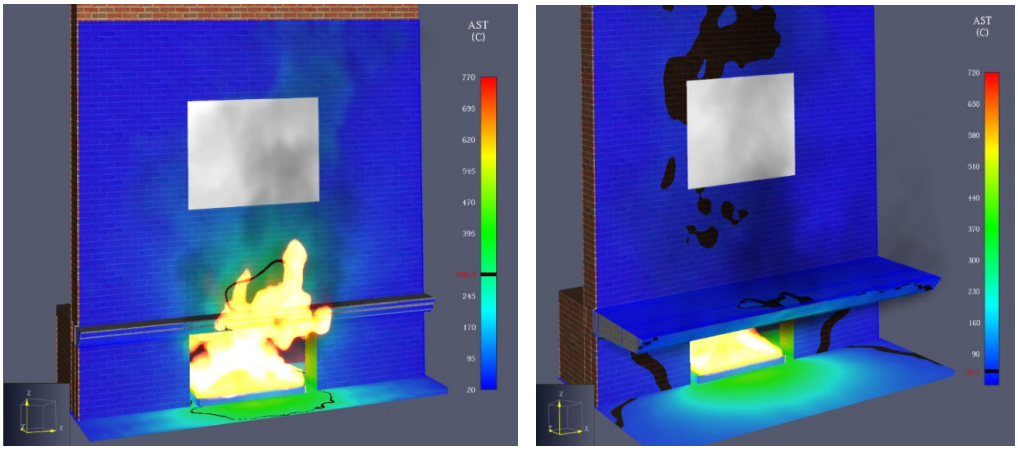


Рисунок 4 – Зовнішній вигляд створених комп'ютерних моделей протипожежних карнизів з формою «вінглету» шириною від 0,3 м до 1,5 м

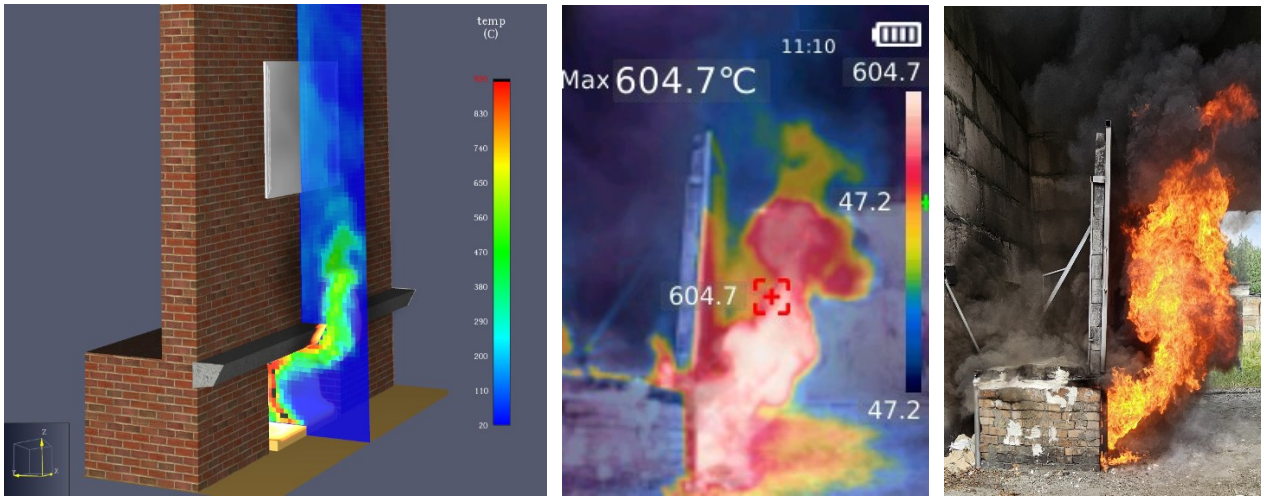
За результатом досліджень проведених методом комп'ютерного моделювання розрахункової пожежі, отримані експериментальні дані, щодо температурних розподілів на поверхні фасаду, який обладнано протипожежним карнизом з формою «вінглету» із шириною виступу від 0,3 м до 1,5 м при значенні пожежної навантаги 780 МДж/м^2. Максимальне зафіксоване значення температури на поверхні фасаду при застосуванні протипожежного карнизу з формою «вінглету» та шириною виступу 0,3 м при наявності вітрового впливу в 5 м/с склало 296 ^{o}C. Отримані дані для протипожежного карнизу шириною 1,5 м з формою «вінглету» за даних умов моделювання, демонструють що максимальна температура не перевищила склала 45 ^{o}C. Ефект повторного приєднання полум'я до фасаду при ширині карнизу 0,3 м відбувається в діапазоні висоти 3,8-4,2 м. Разом із тим, визначено, що ефект повторного приєднання полум'я можливо уникнути при ширині протипожежного карнизу в 0,75 м. На рисунку 5 наведено візуалізацію температурних розподілів на поверхні фасаду, а також характер поширення висхідного потоку для етапу моделювання при застосування протипожежного карнизу шириною 0,3м та 1,5 м.



(а) (б)

Рисунок 5 – Візуалізація температурних розподілів на фасаді при застосуванні протипожежного карнизу з формою «вінглету» шириною від 0,3 м (а) та при застосуванні протипожежного карнизу з формою «вінглету» шириною від 1,5 м (б)

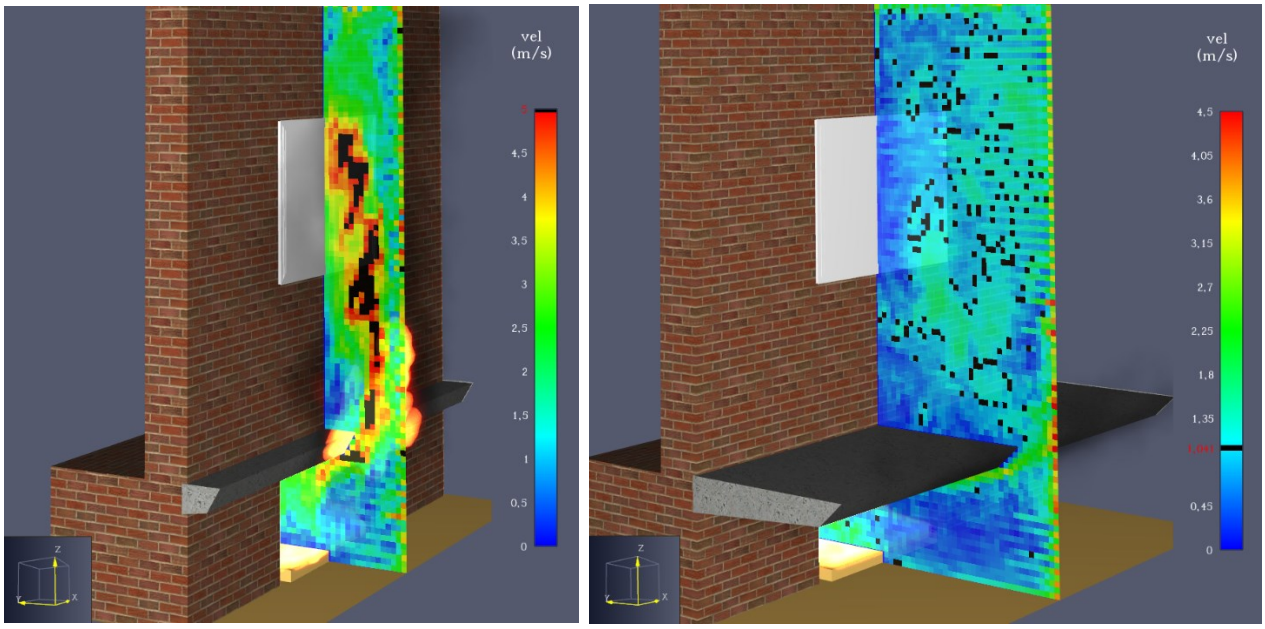
За результатами моделювання встановлено, що максимальна площа критичного прогріву поверхні фасаду, яка спостерігалася при застосуванні даного типу протипожежного карнизу шириною 0,3 м не перевищила 12 % від загальної площі фрагменту досліджуваного фасаду. В порівнянні з результатами натурних вогневих досліджень проведених для даного типу карнизу, де площа критичного прогріву складала до 20%, даний результат обумовлений більш стійким характером поширення полум'я, який не в повній мірі відповідає реальному режиму пожежі під час натурних вогневих досліджень. Ефект повторного приєднання полум'я до фасаду при ширині карнизу 0,3 м відбувається в діапазоні висоти 3,8-4,2 м. Також встановлено, що протипожежний карниз у формі «вінглету» вплинув на висоту утворення зони повторного приєднання полум'я до фасаду у порівнянні із іншими типами протипожежних карнизів. Зокрема даний тип протипожежного карнизу при ширині 0,3 м недоцільно використовувати для захисту вертикальних протипожежних відсіків, оскільки ефект повторного приєднання полум'я може спричинити поширення пожежі на вище розташовані поверхи. Разом із тим, загальні результати комп'ютерного моделювання щодо температурного режиму біля поверхні фасаду та загальний характер траєкторії полум'я цілком відповідають натурним вогневим дослідженням, що приведено на рисунку 6.



(а) (б) (в)

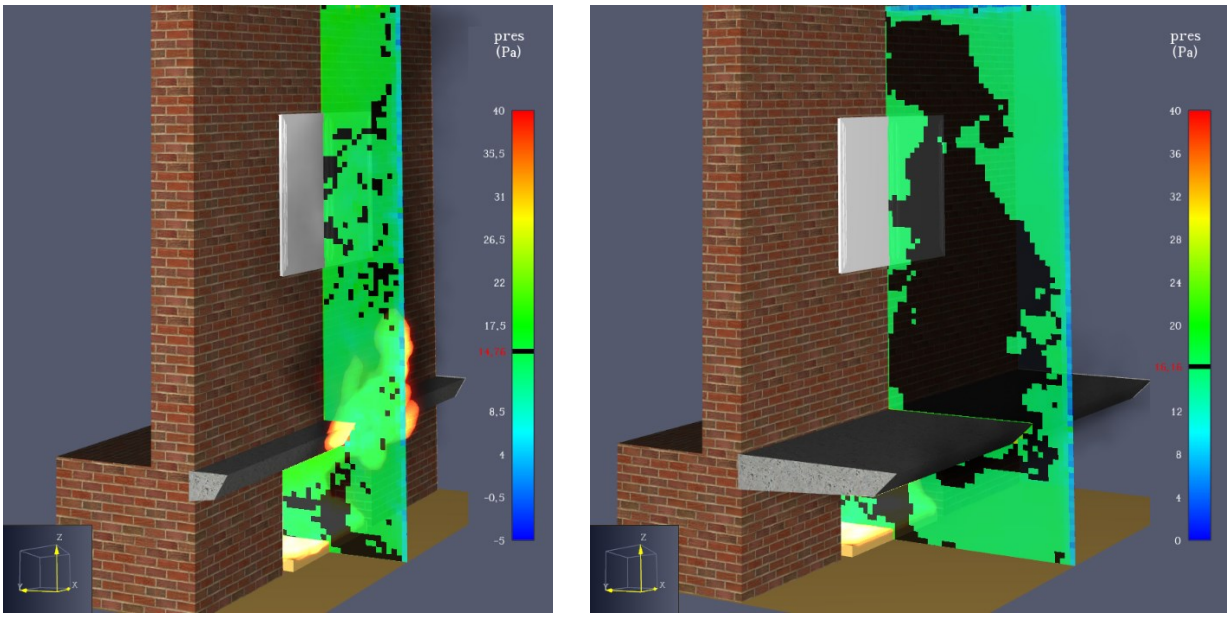
Рисунок 6 – Порівняння візуалізації поширення пожежі за результатом комп'ютерного моделювання та натурних вогневих досліджень для протипожежного карнизу типу «вінглет»,
де (а) – результати комп'ютерного моделювання; (б) – фіксація результатів із застосуванням тепловізора; (в) – фото натурних вогневих досліджень за аналогічних умов досліджень.

Проведене комп'ютерне моделювання дозволило визначити значення середньої швидкості висхідного потоку та значення тиску в зоні фасаду від дії пожежі при застосуванні визначених типів карнизів. На рисунку 7 наведено візуалізацію швидкості висхідного потоку, а на рисунку 8 значення тиску в зоні фасаду від дії пожежі при застосуванні протипожежного карнизу типу «вінглет».



а) б)

Рисунок 7 – Швидкість висхідного потоку при застосуванні протипожежного карнизу шириною 0,3 м (а) та 1,5 м (б) при впливі бокового вітру зі швидкістю 5 м/с.

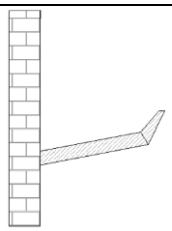


а) б)

Рисунок 8 – Значення тиску в зоні фасаду від дії пожежі при застосуванні протипожежного карнизу шириною 0,3 м (а) та 1,5 м (б) при впливі бокового вітру зі швидкістю 5 м/с.

За результатом проведених розрахункових дій та досліджень, узагальнено та систематизовано результати щодо поширення пожежі по фасаду захищеного протипожежним карнизом з формою «вінглету» із шириною від 0,3 м до 1,5 м, отримані експериментальні дані наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Дані, що характеризують процеси поширення пожежі на вище розташовані поверхи для фасаду обладнаного протипожежним карнизом з формою «вінглету»

Тип протипожежного карнизу	Ширина карнизу, м	Максимальне значення температури зафіксоване в зоні фасаду °С	Площа критичного прогріву, % (±5%)	Висота зони критичного значення температури, м (±0,2 м)	Середня швидкість висхідного потоку, м/с (±0,3 м/с)	Значення тиску в зоні фасаду, Па (±10%)
		з вітром (5 м/с)				
	0,3	296	11	1,8	5,0	14,7
	0,5	220	-	-	4,2	15,0
	0,75	210	-	-	3,7	15,3
	1,0	150	-	-	3,1	15,6
	1,25	90	-	-	2,4	15,9
	1,5	45	-	-	1,2	16,2

Порівняння отриманих даних з таблиці 2 з даними отриманими для базової моделі (таблиця 1) свідчить, що застосування протипожежного карнизу з формою «вінглету» навіть при його ширині виступу до 0,3 м дозволяє знизити максимальне значення температури біля поверхні фасаду до 35%, а площу критичного прогріву досліджуваного фрагменту фасаду фактично в рази.

Висновки та напрями подальших досліджень. За результатом дослідження процесів обмеження поширення пожежі ззовні будівлі за допомогою обчислювальної газо-гідродинаміки, щодо впливу конструктивних параметрів протипожежного карнизу у формі

«вінглету» на процеси обмеження поширення пожежі на вище розташовану зовнішню площину фасаду встановлено, що даний тип протипожежної перешкоди є відносно ефективним для запобігання поширення пожежі. Проведена серія експериментальних досліджень із застосуванням створеної газо-гідродинамічної моделі дозволила отримати дані, щодо фактичних значень максимальної площі критичного прогріву фасаду, висоти зони критичного прогріву фасаду, максимального зафіксованого значення температури на поверхні фасаду, а також середнє значення швидкості висхідного потоку та значення тиску в зоні фасаду при застосуванні визначених типів протипожежних карнизів.

Аналіз отриманих показників критеріїв, що характеризують небезпеку поширення пожежі ззовні фасаду будівлі показав, що протипожежний карних з у формі «вінглету» дозволяє забезпечити максимальне значення тиску в зоні фасаду (в межах 14,5-15,5 Па) при достатньому значені швидкості висхідного потоку (в межах 3-5 м/с). Дані характеристики забезпечують найбільшу відносну ефективність за критерієм максимальної площі критичного прогріву (не більше 12% від всієї захищуваної площі фасаду) та найменший діапазон температур на його поверхні.

Встановлено, що даний тип фасадної протипожежної перешкоди може бути більш ефективним для захисту обмеження поширення пожежі на покрівлю будівлі, оскільки дозволяє створити зону в межах до 1,4 м висоти, де значення температури від дії пожежі не перевищує 170 ^{o}C. При цьому виявлено, що протипожежний карниз у формі «вінглету» має недолік, який значно може вплинути на можливість поширення пожежі між протипожежними відсіками, оскільки виявлено ефект повторного приєднання полум’я на висоті фасаду в межах 1,7 до 4,2 м при його ширини до 0,3 м, що супроводжується утворенням в даній зоні температурного режиму в межах 550-600 ^{o}C. Таким чином, його застосування для забезпечення обмеження поширення пожежі між вертикальними протипожежними відсіками є недоцільним для даних умов конструкції фасаду.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Балло Я. В., Яковчук Р. С., Ніжник В. В. та ін. Дослідження конструктивних параметрів протипожежних карнизів для запобігання поширенню пожежі фасадними конструкціями висотних будинків. *Пожежна безпека*. Львів, 2020. №37. С. 16–23.
2. Яковчук Р. С., Балло Я. В., та ін. FDS моделювання ефективності протипожежних карнизів на запобігання поширенню пожежі фасадними конструкціями висотних будівель *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності.* Львів. 2021. №23, С. 39–45.
3. Oleszkiewicz I. Heat transfer from a window fire plume to a building facade. *ASME HTD – Collected Papers in Heat Transfer*, Canada. 1989. pp. 163–170.
4. Rukavina, M. J., Carevic, M., & Pecur, I. B. (2017). Fire protection of facades. *The Guidelines for Designers, Architects, Engineers and Fire Experts*, pp. 12-15.
5. Балло, Я. ., & Ковалишин, Б. (2024). Експериментальні дослідження з визначення ефективності протипожежних карнизів різної форми. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*, 2(18), С. 35–44.
6. Anderson, J., Boström, L., & Jansson Mcnamee, R. (2017). Fire safety of facadesEngel, T., & Werther, N. (2023). Structural means for fire-safe wooden facade design. *Fire Technology*, p. 1-35.
7. Sassi, S., Setti, P., Amaro, G., Mazziotti, L., Paduano, G., Cancelliere, P., & Madeddu, M. (2016). Fire safety engineering applied to high-rise building facades. In *MATEC web of conferences* (Vol. 46, p. 04002). EDP Sciences.
8. Ko, Y., Aram, M., Zhang, X., & Qi, D. (2023). Fire safety of building integrated photovoltaic systems: Critical review for codes and standards. *Indoor and Built Environment*, *32*(1), p. 25-43.
9. Mazziotti, L., & Cancelliere, P. (2013). The Italian National Guidelines for the fire safety of facades. In *1st International Seminar for Fire Safety of Facades, MATEC Web of Conferences* (Vol. 9).
10. Kagitin, O., Veselivskyi, R., Havrys, A., Ballo, Y., Yakovchuk, R., Kovalyshyn, B. (2024). Determining the influence of facade parameters and the width of a fire-proof eaves on preventing the spread of fire through external vertical structures of buildings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (1 (130)), pp. 6–16.
11. Jensen, G. (2013). Fire spread modes and performance of fire stops in vented facade constructions–overview and standardization of test methods. In *MATEC web of conferences* (Vol. 9, p. 02002). EDP Sciences.
12. GB15763.1-2009. Safety glazing materials in building. Part 1 : Fire-resistant glass. Effective from 2001-07-13. *Official edition. Republic of China : Former State Building Materials Industry Bureau*, 2001. p.13
13. Захист від пожежі. Пожежна безпека об’єктів будівництва: ДБН В.1.1.7-2016. – [Чинні від 2017-06-01]. – К.: Мінрегіон України від 31.10.2016 № 287. – 2017. – 41 с. – (Державні будівельні норми України).
14. Rossa, C. G., & Fernandes, P. M. (2018). An empirical model for the effect of wind on fire spread rate. *Fire*, *1*(2), 31.;

15. Beer, T. (1991). The interaction of wind and fire. *Boundary-Layer Meteorology*, 54(3), 287–308.
16. Thomas, P. H. (1971). Rates of spread of some wind-driven fires. Forestry: *An International Journal of Forest Research*, 44(2), 155–175.

REFERENCES

1. Ballo, Ya. V., Yakovchuk, R. S., Nizhnyk, V. V., et al. (2020). Doslidzhennia konstruktyvnykh parametriv protypozhezhnykh karnyziv dlia zapobihannia poshyrenniu pozhezhi fasadnymy konstruktsiiamy vysotnykh budynkiv [Study of structural parameters of fire-resistant cornices to prevent fire spread through facade structures of high-rise buildings]. *Pozhezhna Bezpeka*, (37), 16–23. [in Ukrainian].
2. Yakovchuk, R. S., Ballo, Ya. V., et al. (2021). FDS modeliuvannia efektyvnosti protypozhezhnykh karnyziv na zapobihannia poshyrenniu pozhezhi fasadnymy konstruktsiiamy vysotnykh budivel [FDS modeling of the effectiveness of fire-resistant cornices in preventing fire spread through facade structures of high-rise buildings]. *Visnyk Lvivskoho Derzhavnoho Universytetu Bezpeky Zhyttiediialnosti*, (23), 39–45. [in Ukrainian].
3. Oleszkiewicz, I. (1989). Heat transfer from a window fire plume to a building facade. ASME HTD – *Collected Papers in Heat Transfer*, 163–170. [in English].
4. Rukavina, M. J., Carevic, M., & Pecur, I. B. (2017). Fire protection of facades. The Guidelines for Designers, *Architects, Engineers and Fire Experts*, 12–15. [in English].
5. Ballo, Ya., & Kovalishyn, B. (2024). Eksperymentalni doslidzhennia z vyznachennia efektyvnosti protypozhezhnykh karnyziv riznoi formy [Experimental studies to determine the effectiveness of fire-resistant cornices of various shapes]. *Naukovyi Visnyk: Tsyvilnyi Zakhyst ta Pozhezhna Bezpeka*, 2(18), 35–44. [in Ukrainian].
6. Anderson, J., Boström, L., & Jansson Mcnamee, R. (2017). Fire safety of facades. Engel, T., & Werther, N. (2023). *Structural means for fire-safe wooden facade design. Fire Technology*, 1–35. [in English].
7. Sassi, S., Setti, P., Amaro, G., Mazziotti, L., Paduano, G., Cancelliere, P., & Madeddu, M. (2016). Fire safety engineering applied to high-rise building facades. In *MATEC Web of Conferences*, 46, 04002. [in English].
8. Ko, Y., Aram, M., Zhang, X., & Qi, D. (2023). Fire safety of building integrated photovoltaic systems: Critical review for codes and standards. *Indoor and Built Environment*, 32(1), 25–43. [in English].
9. Mazziotti, L., & Cancelliere, P. (2013). The Italian National Guidelines for the fire safety of facades. In 1st International Seminar for Fire Safety of Facades, *MATEC Web of Conferences*, 9. [in English].
10. Kagitin, O., Veselivskyi, R., Havrys, A., Ballo, Y., Yakovchuk, R., & Kovalyshyn, B. (2024). Determining the influence of facade parameters and the width of a fire-proof eaves on preventing the spread of fire through external vertical structures of buildings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(1(130)), 6–16. [in English].
11. Jensen, G. (2013). Fire spread modes and performance of fire stops in vented facade constructions – overview and standardization of test methods. *In MATEC Web of Conferences*, 9, 02002. [in English].
12 Former State Building Materials Industry Bureau. (2001). GB15763.1-2009. *Safety glazing materials in building. Part 1: Fire-resistant glass*. Republic of China. [in English].
13. Minregion Ukrainy. (2017). Zakhyst vid pozhezhi. Pozhezhna bezpeka obiektiv budivnytstva: DBN V.1.1.7-2016 [Fire protection. Fire safety of construction objects: DBN V.1.1.7-2016]. Kyiv: Minregion Ukrainy. [in Ukrainian].
14. Rossa, C. G., & Fernandes, P. M. (2018). An empirical model for the effect of wind on fire spread rate. *Fire*, 1(2), 31. [in English].
15. Beer, T. (1991). The interaction of wind and fire. *Boundary-Layer Meteorology*, 54(3), 287–308.
16. Thomas, P. H. (1971). Rates of spread of some wind-driven fires. Forestry: *An International Journal of Forest Research*, 44(2), 155–175.

STUDY OF THE PROCESSES OF LIMITING THE SPREAD OF FIRE FROM OUTSIDE THE BUILDING USING COMPUTATIONAL GAS HYDRODYNAMICS

Ya. Ballo, B. Kovalyshyn

Institute of Scientific Research on Civil Protection of the National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine

KEYWORDS:

spread of external fire, fire-fighting cornices, facade fire barriers, fire safety, dangerous fire factors.

ABSTRACT

The paper investigates the impact of structural parameters of fire protection cornices on the processes of limiting the spread of fire from the outside of the facade using a gas-hydrodynamic model. The research methodology is described, as well as the initial parameters used when creating a computer model of a facade fragment and the types of facade fire barriers under study. An analytical review of previous scientific works on the study of the main criteria characterizing the danger of fire spreading to the upper floors of the building, as well as the most dangerous scenarios of fire occurrence and development, is conducted. The main stages of the program of experimental research on the processes of fire spreading from the outside of the facade using the method of computational gas-hydrodynamics are formed and described. The experimental plan, the sequence of research stages, the characteristics of the computer model, and the structural parameters of the recreated model of the installation for predicting the spread of fire on building facades are presented. The environmental parameters and the duration of each stage of computer modeling are substantiated. The relative efficiency of the “winglet” type cornice for widths of 0.3 m; 0.5 m; 0.75 m; 1.0 m; 1.25 m and 1.5 m was investigated, in particular in terms of the maximum area of critical heating of the facade, the average velocity of the upward flow and the pressure value in the facade zone. It was established that the fire-fighting cornice in the form of a “winglet” with its width of 0.3 m is inappropriate to use for facade protection at the boundaries of vertical fire compartments. The systematization of the obtained data allowed us to assess the influence of the design parameters of fire-fighting cornices on the dynamics of processes related to limiting the spread of dangerous fire factors to higher floors. In addition, the obtained data will allow us to more effectively use fire-fighting cornices to protect various functional areas of the building.

УДК 614.841

ПРО ВИЗНАЧЕННЯ ЗАГАЛЬНО-СВІТОВИХ ПІДХОДІВ ДО КЛАСИФІКАЦІЙНИХ ВИМОГ ЩОДО ПОЖЕЖНИХ ТА АВАРІЙНО-РЯТУВАЛЬНИХ АВТОМОБІЛІВ

https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.1.(19).44-52

Семичаєвський С. В.[1*], ORCID iD 0000-0002-2413-5386
Присяжнюк В. В.[2], ORCID iD 0000-0002-9780-785X
Якіменко М. Л.[1], ORCID iD 0000-0003-4988-8015
Осадчук М. В.[1], ORCID iD 0000-0002-4584-3541
Свірський В. В.[1], ORCID iD 0000-0003-0820-9143
Бєлікова К. Г.[1*], ORCID iD 0000-0001-7475-2115
*E-mail: acutus@ukr.net

[1]*Інститут наукових досліджень з цивільного захисту НУЦЗ України, Україна*
[2]*Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Україна*

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ
Надійшла до редакції:
29.04.2025
Пройшла рецензування:
23.05.2025

КЛЮЧОВІ СЛОВА:
категорії, класифікація, національний стандарт, пожежні та аварійно-рятувальні автомобілі, типи

АНОТАЦІЯ
Встановлено актуальність питання з удосконалення національної нормативної бази щодо класифікаційних вимог до пожежно-рятувальних автомобілів. Проаналізовано національні стандарти України та країн ЄС, що встановлюють класифікаційні вимоги до пожежних та аварійно-рятувальних автомобілів. Встановлено, що пожежні автомобілі поділяються на: пожежні та рятувальні автомобілі (пожежні автомобілі з насосним обладнанням, автомобілі цільового призначення), автопідіймачі (поворотні автодрабини, гідравлічні платформи), аварійно-рятувальні автомобілі, пожежні автомобілі медичної допомоги, автомобілі для ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, автомобілі штабні, транспортні засоби для перевезення особового складу, допоміжні транспортні засоби, пожежні автомобілі іншого призначення. Встановлено відмінності класифікації за типами пожежних автомобілів залежно від основного виду застосування в Україні та країнах ЄС. Наведено загальний вид пожежних автомобілів різних типів, які відповідають європейській класифікації. Вказано європейську класифікацію за масою автомобілів з повною масою у спорядженому стані понад 3 тонни. Наведено такі категорії пожежних автомобілів, залежно від їх здатності рухатися дорогами або бездоріжжям, а саме: категорія 1 (міські) – транспортні засоби, що використовуються зазвичай для руху поверхнями збудованих доріг (автомобілі 1-ї категорії зазвичай мають один привідний міст); категорія 2 (сільські) – транспортні засоби, здатні рухатися будь-якими дорогами, з обмеженою здатністю рухатися бездоріжжям; категорія 3 (всюдихідні) – транспортні засоби, здатні рухатися будь-якими дорогами та бездоріжжям. Виявлено недоліки загальносвітових підходів до класифікаційних вимог щодо пожежних та аварійно-рятувальних автомобілів. Зазначено, що нині в Україні та країнах ЄС є різні підходи до позначення пожежних автомобілів. Наведено відповідні приклади позначення пожежних автомобілів згідно з вітчизняною та європейською нормативною документацією. Акцентовано увагу на тому, що на сьогодні вимоги національного стандарту, що встановлює загальні технічні умови до автомобілів гасіння, застаріли і не відповідають вимогам сьогодення, а саме: стандарт орієнтований на виготовлення несучасних моделей пожежних автомобілів, тому перешкоджає технічному прогресу у галузі та містить занижені вимоги до їх модельного ряду.

Постановка проблеми. Для ліквідації надзвичайних ситуацій пожежно-рятувальні підрозділи ДСНС України використовують низку різної за призначенням пожежно-рятувальної техніки. За період агресії російської

федерації та нині значна кількість пожежно-рятувальної техніки є пошкодженою та зруйнованою і відновленню не підлягає. У зв'язку з окресленим в рамках гуманітарної допомоги від країн-партнерів в Україну надходять зразки пожежно-рятувальної техніки, яка за технічними характеристиками та конструктивними вимогами відрізняється від техніки, що експлуатується пожежно-рятувальними підрозділами ДСНС України та відповідає вимогам чинних в Україні національних стандартів.

Слід зазначити, що класифікація, призначення та позначення пожежно-рятувальних автомобілів в Україні суттєво відрізняються від країн ЄС. Україна рухається до членства в ЄС і щорічно приймає низку нормативних документів, що відповідають європейським вимогам. Чинний в Україні ДСТУ EN 1846-1:2017 [1] прийнято методом підтвердження, що ускладнює його імплементацію у практичну діяльність.

Тому набуває актуальності питання удосконалення національної нормативної бази щодо класифікаційних вимог до пожежно-рятувальних автомобілів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У звіті [2] висвітлено результати пошукової науково-дослідної роботи з визначення шляхів удосконалення технічного рівня, ефективності застосування протипожежної, аварійно-рятувальної та іншої спеціальної техніки і обладнання. Зокрема, у звіті [2] наведено аналіз вітчизняного та світового досвіду щодо застосування пожежних та аварійно-рятувальних автомобілів. Вказано модельний ряд основних типів автомобілів, що використовуються в Україні та країнах ЄС, але ця робота не містить досліджень щодо визначення загальносвітових підходів до класифікаційних вимог щодо пожежних та аварійно-рятувальних автомобілів.

У публікації польських дослідників Chmiel M., Markowski T., Kowalczyk A. [3] розглянуто питання класифікації, маркування та поділу пожежних та аварійно-рятувальних транспортних засобів згідно з вимогами EN 1846-1:2011 [4]. У публікації [3] наведено типи пожежних та аварійно-рятувальних транспортних засобів, їх класи за масою, поділ на категорії залежно від прохідності. Наведено приклади позначення цих транспортних засобів. Наголошується на важливості маркування пожежних та аварійно-рятувальних транспортних засобів, що дозволяє точно їх ідентифікувати під час організації закупівель такої техніки та безпосередньо в процесі проведення пожежно-рятувальних робіт.

Водночас публікація [3] не містить аналізу недоліків європейських підходів щодо класифікації та позначення пожежних та аварійно-рятувальних автомобілів.

Формулювання цілей дослідження. Метою цього дослідження є визначення загальносвітових підходів до класифікаційних вимог щодо пожежно-рятувальних автомобілів. Для досягнення цієї мети було поставлено завдання щодо порівняння класифікаційних вимог до пожежно-рятувальних автомобілів в Україні та країнах ЄС. У цій статті застосовано аналітичний метод дослідження.

Виклад основного матеріалу дослідження. В країнах ЄС діє низка стандартів, згідно з якими виготовляються пожежно-рятувальні автомобілі, а саме EN 1846-1:2011 [4],EN 1846-2:2009 + A1:2013 [5] та EN 1846-3:2013 [6].

В Україні діють національні стандарти України ДСТУ EN 1846-1:2017 [1],ДСТУ EN 1846-2:2018 [7] та ДСТУ EN 1846-3:2018 [8], які прийнято методом підтвердження (обкладинки). Структура та зміст цих документів відповідають аналогічним європейським нормам.

Європейський стандарт EN 1846-1:2011 [4] було розроблено з метою встановлення єдиної системи позначення пожежних та аварійно-рятувальних транспортних засобів. Він також установлює характеристики будь-якого транспортного засобу за серійним номером і літерою.

Стандарт EN 1846-1:2011 [4] установлює класи та категорії, залежно від призначення і маси пожежних та аварійно-рятувальних транспортних засобів, а також регламентує систему позначення, яка встановлює різноманітні критерії, що використовуються для характеризування транспортних засобів.

Згідно з EN 1846-1:2011 [4], залежно від основного виду застосування, пожежні автомобілі поділяються на такі типи:

– пожежні та рятувальні автомобілі:

– *пожежні автомобілі з насосним обладнанням;*

– *автомобілі цільового призначення.*

– автопідіймачі:

– *поворотні автодрабини;*

– *гідравлічні платформи.*

– аварійно-рятувальні автомобілі;

– пожежні автомобілі медичної допомоги;

– автомобілі для ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій;

– автомобілі штабні;

– транспортні засоби для перевезення особового складу;

– допоміжні транспортні засоби;

– пожежні автомобілі іншого призначення.

Слід зауважити, що в Україні та країнах ЄС наявна різна класифікація за типами пожежних автомобілів залежно від основного виду застосування.

До пожежних автомобілів з насосним обладнанням (pumping appliance) згідно з EN 1846-1:2011 [4] належать пожежні автоцистерни, насосно-рукавні пожежні автомобілі, пожежні автонасосні станції за класифікацією, прийнятою у ДСТУ 2273:2006 [9].

До автомобілів цільового призначення (appliance for specific fire) згідно з EN 1846-1:2011 [4] належать (пожежні) автомобілі комбінованого гасіння, (пожежні) автомобілі пінного гасіння, (пожежні) автомобілі порошкового гасіння, (пожежні) автомобілі газового гасіння, згідно з прийнятою класифікацією у ДСТУ 2273:2006 [9].

До автопідіймачів (high rise aerial appliance) згідно з EN 1846-1:2011 [4] належать пожежні автодрабини та пожежні автопідіймачі, згідно з прийнятою класифікацією у ДСТУ 2273:2006 [9].

Термін «поворотна автодрабина (turntable ladder)» згідно з EN 1846-1:2011 [4] відповідає терміну «пожежна автодрабина» згідно з прийнятою класифікацією у ДСТУ 2273:2006 [9].

Термін «гідравлічна платформа (hydraulic platform (HP))» згідно з EN 1846-1:2011 [4] відповідає терміну «пожежний автопідіймач» згідно з прийнятою класифікацією у ДСТУ 2273:2006 [9].

До допоміжних транспортних засобів (support vehicle) згідно з EN 1846-1:2011 [4] належать пожежні автомобілі зв’язку та освітлення, пожежні автомобілі – лабораторії, пожежні автомобілі технічного забезпечення згідно з прийнятою класифікацією у ДСТУ 2273:2006 [9].

До пожежних автомобілів іншого призначення (other specialised motor vehicle) згідно з EN 1846-1:2011 [4] належать пожежні автомобілі димовидалення та пожежні автомобілі газодимозахисту згідно з прийнятою класифікацією у ДСТУ 2273:2006 [9].

На рисунку 1 наведено загальний вигляд пожежних автомобілів з насосним обладнанням, а на рисунку 2 – загальний вигляд аварійно-рятувальних автомобілів, які відповідають класифікації, наведеної в EN 1846-1:2011 [4].

Рисунок 1 – Загальний вигляд пожежних автомобілів з насосним обладнанням

Рисунок 2 – Загальний вид аварійно-рятувальних автомобілів

У розділі 3 «Класи за масою автомобілів» EN 1846-1:2011 [4] вказано, що усі транспортні засоби з повною масою у спорядженому стані (GLM згідно з визначенням, поданим в 3.2 EN 1846-2:2009 [4]) понад 3 т класифікують з віднесенням до одного з таких трьох класів залежно від GLM:

– L (легкі): 3 т < GLM ≤ 7,5 т;
– M (середні): 7,5 т < GLM ≤ 16 т;
– S (важкі): GLM > 16 т.

Очевидно, що одним із недоліків європейського нормативного документу EN 1846-1:2011 [4] є те, що класифікація пожежних автомобілів за масою не поширюється на автомобілі з повною масою у спорядженому стані менше ніж 3 тонни.

Згідно з розділом 4 «Категорії автомобілів» EN 1846-1:2011 [4], усі транспортні засоби класифікують з віднесенням до однієї з таких трьох категорій залежно від їх здатності рухатися дорогами або бездоріжжям:

– категорія 1 (міські) – транспортні засоби, що використовуються зазвичай для руху поверхнями збудованих доріг (автомобілі 1-ї категорії, як правило, мають один привідний міст);

– категорія 2 (сільські) – транспортні засоби, здатні рухатися будь-якими дорогами, з обмеженою здатністю рухатися бездоріжжям;

– категорія 3 (всюдихідні) – транспортні засоби, здатні рухатися будь-якими дорогами та бездоріжжям.

Можна зазначити такі відмінності між транспортними засобами, усі мости яких зазвичай є привідними:

– з обмеженою здатністю рухатися бездоріжжям;

– з підвищеною здатністю рухатися бездоріжжям, що зазвичай досягається передбаченням, наприклад, блокуванням диференціалу та передбаченням одиночних шин.

На транспортних засобах 3-ї категорії всі мости, як правило, приводяться в дію блокуванням диференціалу та передбаченням одиничних шин.

На теперішній час в Україні та країнах ЄС є різні підходи до позначення пожежних автомобілів.

Так, згідно з розділом 6 «Позначення автомобілів» EN 1846-1:2011 [4], позначення автомобілів, що відповідають серії EN 1846, складається з такого:

– Тип;
– Посилання на EN 1846;
– Клас за масою;
– Категорія;

– Якщо це застосовне: маркування, передбачене специфічними стандартами (європейськими та/або національними).

Можливе додаткове маркування, передбачене EN 1846-3, наприклад:

– Місткість цистерни для води, використовуваної з метою гасіння пожежі;

– Продуктивність установленого насоса;

– Місткість бака для піноутворювача;

– Лафетний ствол.

Інші можливі додаткові маркувальні позначки, наприклад:

– Кількість місць для сидіння розрахунку.

На рисунку 3 наведено приклад позначення автоцистерни на шасі автомобіля класу М (середнього) за масою, категорії 1 (міський), виготовленої згідно з додатковими вимогами, встановленими національним стандартом:

Рисунок 3 – Приклад позначення пожежно-рятувального автомобіля згідно з EN 1846

На рисунку 4 наведено приклад позначення поворотної автодрабини на шасі автомобіля класу М (середнього) за масою, категорії 1 (міський), виготовленої згідно з EN 14043 [10].

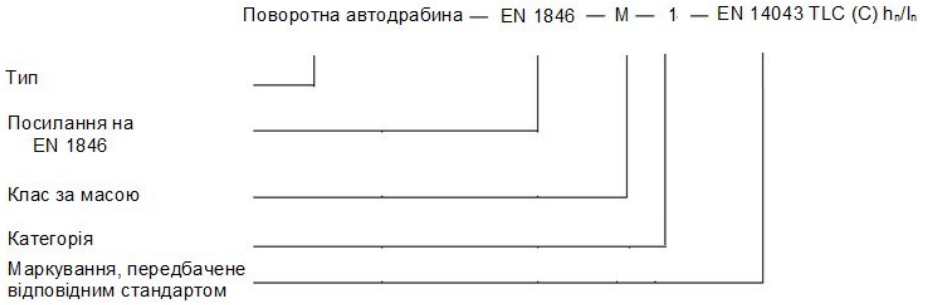


Рисунок 4 – Приклад позначення поворотної автодрабини згідно з EN 1846

Нині в Україні є чинним Національний стандарт України ДСТУ 3286-95 [11], який поширюється на спеціальні автомобілі пожежогасіння, що виготовляються на автомобільних шасі вантажопідйомністю від 2 т до 10 т та призначені для доставки бойової обслуги, засобів пожежогасіння і устаткування до місця пожежі для її ліквідації.

Зазначений стандарт встановлює класифікацію і основні параметри та характеристики (властивості) пожежних автомобілів, вимоги до кабіни, кузовів, приводу спецагрегатів, посудин для вогнегасних речовин, лафетних стволів, електрообладнання, зовнішнього освітлення та світосигнального обладнання, конструктивні вимоги, вимоги ергономіки, вимоги до сировини, матеріалів і комплектувальних виробів, вимоги безпеки та охорони навколишнього середовища, вимоги щодо комплектності, маркування та пакування.

У таблиці 1 згідно з вимогами ДСТУ 3286-95 [11] наведено типи пожежних

автомобілів, їх літерне позначення і назви головних параметрів.

У таблиці 1 згідно з вимогами ДСТУ 3286-95 [11] наведено типи пожежних автомобілів, їх літерне позначення і назви головних параметрів.

Таблиця 1 – Типи пожежних автомобілів, їх літерне позначення і назви головних параметрів згідно з ДСТУ 3286-95 [11]

Тип автомобіля	Літературне позначення типу автомобіля	Назва головного параметра
Автоцистерни пожежні	АЦ	Номінальна подача насосної установки, л/с
Автомобілі насосно-рукавні пожежні	АНР	Те саме
Автомобілі аеродромні пожежні	АА	Те саме
Автомобілі водопінного пожежогасіння	АВ	Те саме
Автомобілі порошкового гасіння пожежні	АП	Загальний запас вогнегасного порошку, тонн
Автомобілі комбінованого гасіння пожежі	АКТ	Загальний запас вогнегасних речовин, тонн
Автомобілі газоводяного гасіння пожежі	АГВТ	Витрата газоводяної суміші, кг/с

На рисунку 5 наведено структурну схему позначення автомобілів типу АЦ (автоцистерни пожежної)

Приклад умовного позначення автоцистерни пожежної типу АЦ, з номінальною подачею вогнегасних речовин 30 л/с, з номером моделі базового шасі ГАЗ 66-11 і порядковим номером моделі автоцистерни 184 у технічній документації і під час замовлення:

Автоцистерна пожежна АЦ-30(66-11)-184ТУ

Рисунок 5 – Структурна схема позначення автомобілів типу АЦ (автоцистерни пожежної)

Разом з тим, можна констатувати той факт, що на сьогодні вимоги зазначеного стандарту ДСТУ 3286-95 [11], які висуваються до якості пожежних автомобілів, застаріли і не відповідають вимогам сьогодення, а саме: стандарт орієнтований на виготовлення застарілих моделей пожежних автомобілів, тому перешкоджає технічному прогресу у галузі, містить занижені вимоги до модельного ряду пожежних автомобілів, що стандартизуються, встановлює моделі пожежних автомобілів на старих шасі, які знято з виробництва, тобто вже технічно та морально застаріли.

Національний стандарт ДСТУ EN 1846-2:2018 [7] встановлює мінімальні вимоги до безпеки та показників якості

пожежно-рятувальних автомобілів. Також стандарт розглядає вимоги технічної безпеки, щоб мінімізувати небезпеки, перераховані в ньому, і які можуть виникати під час перевіряння, оперативного застосування, періодичного огляду та технічного обслуговування автодрабин, що здійснюються відповідно до Настанови з експлуатації, наданої виробником або його уповноваженим представником.

Національний стандарт ДСТУ EN 1846-2:2018 [7] також встановлює експлуатаційні вимоги. Автомобілі, на які поширюється цей стандарт, експлуатуються в межах температурного діапазону від мінус 15 °С до 35 °С. Для використання поза межами зазначеного діапазону можуть бути вжиті необхідні додаткові заходи (це повинно бути узгоджено між виробником та користувачем). Спеціальні конструкції для використання в особливих кліматичних умовах виготовлюються за домовленістю між виробником та покупцем.

Стандарт містить перелік суттєвих можливих небезпек, небезпечних ситуацій та подій, наскільки вони розглядаються в цьому стандарті, ідентифікованому за оцінкою небезпеки, як істотними для цього виду машинного устаткування та які вимагають дій для позбавлення або зменшення небезпеки.

Стандарт ДСТУ EN 1846-2:2018 [7] також містить вимоги до статичної та динамічної стійкості, до двигуна, до складових частин, що обертаються, до навантажень на вісь, до гальм, шин, кузова, кабіни, до конструктивних параметрів, до ергономічних показників, до електричних мереж, до засобів управління та регулювання тощо.

У додатках міститься інформація щодо проведення випробувань та перевірок.

Національний стандарт ДСТУ EN 1846-3:2018 [8] встановлює мінімальні вимоги щодо безпеки та експлуатаційних характеристик окремих видів додаткового стаціонарно встановленого устаткування пожежно-рятувальних транспортних засобів, експлуатованих навченими особами, які позначено згідно з ДСТУ EN 1846-1:2017 [1] та вимоги щодо яких встановлено ДСТУ EN 1846-2:2018 [7].

Як було вказано вище, чинний в Україні ДСТУ EN 1846-1:2017 [1] прийнято методом підтвердження, що ускладнює його імплементацію у практичну діяльність. З метою розв’язання зазначеної проблеми в Інституті наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України за результатами проведеної науково-дослідної роботи розроблено проєкт Національного стандарту України ДСТУ EN 1846-1:202_(EN 1846-1:2011, IDT) *Пожежні та аварійно-рятувальні транспортні засоби. Частина 1. Номенклатура та позначення*, який розроблено на заміну ДСТУ EN 1846-1:2017 [1] методом перекладу та є гармонізованим до європейського стандарту EN 1846-1:2011 [4].

Розроблений проєкт Національного стандарту України після затвердження національним органом стандартизації буде застосовуватись пожежно-рятувальними підрозділами ДСНС та виробниками пожежно-рятувальної техніки та сприятиме імплементації у практичну діяльність пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС класифікаційних вимог до пожежних та аварійно-рятувальних автомобілів.

Висновки та напрями подальших досліджень:

1. Під час визначення загальносвітових підходів до класифікаційних вимог щодо пожежних та аварійно-рятувальних автомобілів виявлено суттєві відмінності між нормативними документами, що діють в Україні, та у провідних країнах світу, які регламентують класифікаційні вимоги, номенклатуру та позначення цих автомобілів, які полягають у:

– різній класифікації за типами пожежних автомобілів залежно від основного виду застосування;

– різних підходах до позначення пожежних автомобілів;

– різних підходах до визначення маси автомобіля, зокрема відсутності у нормативних документах, що діють в Україні, вимог щодо класифікації

автомобілів за масою;

– відсутності у нормативних документах, що діють в Україні, класифікації з віднесенням до категорій залежно від їх здатності рухатися дорогами або бездоріжжям.

2. Виявлено недолік в європейському нормативному документі, що регламентує класифікаційні вимоги, номенклатуру та позначення пожежних та аварійно-рятувальних автомобілів (EN 1846-1:2017), який полягає в тому, що класифікація пожежних автомобілів за масою не поширюється на автомобілі з повною масою у спорядженому стані менше ніж 3 тонни.

3. З'ясовано, що у позначенні пожежних автоцистерн згідно з EN 1846-1:2017 [4] можливе додаткове маркування згідно з ДСТУ EN 1846-3:2018 [8], яке передбачає:

– місткість цистерни для води, використовуваної з метою гасіння пожежі;

– продуктивність установленого насоса;

– місткість бака для піноутворювача;

– лафетний ствол;

– кількість місць для сидіння розрахунку.

4. На підставі проведених досліджень вперше в Україні розроблено проєкт Національного стандарту, який після впровадження встановлюватиме європейську класифікацію, а саме: класи та категорії залежно від призначення і маси пожежних та аварійно-рятувальних транспортних засобів, а також регламентуватиме систему позначення, що встановлює різноманітні критерії для характеризування транспортних засобів.

5. Надалі, у разі внесення змін до європейського стандарту EN 1846-1:2017 [4], буде здійснено перегляд відповідного Національного стандарту України, що встановлює класифікаційні вимоги до пожежних та аварійно-рятувальних автомобілів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ EN 1846-1:2017. Протипожежна техніка. Пожежно-рятувальні автомобілі. Частина 1. Номенклатура і позначення (EN 1846-1:2011, IDT). [Чинний 2017-10-01]. Вид. офіц. Київ : ДП УкрНДНЦ, 2017. 11 с.
2. Провести пошукові дослідження та визначити шляхи удосконалення технічного рівня, ефективності застосування протипожежної, аварійно-рятувальної та іншої спеціальної техніки і обладнання : звіт про науково-дослідну роботу / УкрНДІЦЗ. Київ, 2016. 784 с.
3. Chmiel, M., Markowski, T., & Kowalczyk, A. (2013). Firefighting Vehicles Classification, Labelling and Division / Klasyfikacja, oznaczenie i podział pojazdów pożarniczych. *Bezpieczeństwo I Technika Pożarnicza*, 32(4), 67–78. doi: https://doi.org/10.12845/bitp.32.4.2013.8.
4. EN 1846-1:2011. Firefighting and rescue service vehicles. Part 1: Nomenclature and designation (Транспортні засоби для пожежних та рятувальних підрозділів. Частина 1. Номенклатура та позначення). Document published on: 2011–04–27. Austria: CEN. 2011. 10 p.
5. EN 1846-2:2009 + A1:2013. Firefighting and rescue service vehicles. Part 2: Common requirements. Safety and performance (Транспортні засоби для пожежних та рятувальних підрозділів. Частина 2: Загальні вимоги. Безпека та показники якості). Document published on: 2009–08–05. Austria: CEN. 2009. 59 p.
6. EN 1846-3:2013. Firefighting and rescue service vehicles. Part 3: Permanently installed equipment. Safety and performance (Транспортні засоби для пожежних та рятувальних підрозділів. Частина 3: Устаткування, яке встановлюється стаціонарно. Безпека та показники якості). Document published on: 2013–07–24. Austria: CEN. 2013. 52 p.
7. ДСТУ EN 1846-2:2018. Пожежно-рятувальні транспортні засоби. Частина 2. Загальні вимоги. Безпека та експлуатаційні характеристики (EN 1846-2:2009+A1:2013, IDT). [Чинний 2019-10-01]. Київ : ДП УкрНДНЦ, 2018. 48 с.
8. ДСТУ EN 1846-3:2018. Пожежно-рятувальні транспортні засоби. Частина 3. Стаціонарно встановлене устаткування. Безпека та експлуатаційні характеристики (EN 1846-3:2013, IDT). [Чинний 2019-10-01]. Київ : ДП УкрНДНЦ, 2018. 38 с.
9. ДСТУ 2273:2006. Протипожежна техніка. Терміни та визначення основних понять. [Чинний від 2007-04-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2006. 43 с.
10. EN 14043:2014. High rise aerial appliances for fire service use – Turntable ladders with combined movements – Safety and performance requirements and test methods. Document published on: 2014–07–31. Belgium : CEN. 2014. 88 p.
11. ДСТУ 3286-95. Пожежна техніка. Автомобілі гасіння. Загальні технічні умови (ГОСТ 26938-95). [Чинний від 1997-01-01]. Вид. офіц. Київ : ДП УкрНДНЦ, 1996. 25 с.

REFERENCES

1. *Protypozhezhna tekhnika. Pozhezhno-riatuvalni avtomobili. Chastyna 1. Nomenklatura i poznachennia* [Firefighting equipment. Fire and rescue vehicles. Part 1: Nomenclature and designations]. (2017). DSTU EN 1846-1:2017 from 1st October 2017. Kyiv: DP UkrNDNTs [in Ukrainian].
2. *Provesty poshukovi doslidzhennia ta vyznachyty shliakhy udoskonalennia tekhnichnoho rivnia, efektyvnosti zastosuvannia protypozhezhnoi, avariino-riatuvalnoi ta inshoi spetsialnoi tekhniky i obladnannia* [To conduct prospecting research and identify

ways to improve the technical level and efficiency of firefighting, emergency rescue and other special equipment and machinery]. (2016). Kyiv: UkrNDITsZ [in Ukrainian].
3. KhmiL, M., Markovskyi, T., & Kovalchyk, A. (2013). Klasyfikatsiia, pryznachennia ta budova pozhezhnykh avtomobiliv [Firefighting Vehicles Classification, Labelling and Division]. *Pozhezhna bezpeka ta tekhnolohii*, 32(4), 67–78. doi: https://doi.org/10.12845/bitp.32.4.2013.8 [in Polish].
4 *Transportni zasoby dlia pozhezhnykh ta riatuvalnykh pidrozdiliv. Chastyna 1. Nomenklatura ta poznachennia* [Firefighting and rescue service vehicles. Part 1: Nomenclature and designation]. (2011). EN 1846-1:2011 from 27th April 2011. Austria: CEN [in English].
5. *Transportni zasoby dlia pozhezhnykh ta riatuvalnykh pidrozdiliv. Chastyna 2: Zahalni vymohy. Bezpeka ta pokaznyky yakosti* [Firefighting and rescue service vehicles. Part 2: Common requirements. Safety and performance]. (2009). EN 1846-2:2009 + A1:2013 from 5th August 2009. Austria: CEN [in English].
6. *Transportni zasoby dlia pozhezhnykh ta riatuvalnykh pidrozdiliv. Chastyna 3: Ustatkovannia, yake vstanovliuietsia statsionarno. Bezpeka ta pokaznyky yakosti* [Firefighting and rescue service vehicles. Part 3: Permanently installed equipment. Safety and performance]. (2013). EN 1846-3:2013 from 24th July 2013. Austria: CEN [in English].
7. *Pozhezhno-riatuvalni transportni zasoby. Chastyna 2. Zahalni vymohy. Bezpeka ta ekspluatatsiini kharakterystyky* [Fire and rescue vehicles. Part 2. General requirements. Safety and performance characteristics]. (2018). DSTU EN 1846-2:2018 from 1st October 2019. Kyiv: DP UkrNDNTs [in Ukrainian].
8. *Pozhezhno-riatuvalni transportni zasoby. Chastyna 3. Statsionarno vstanovlene ustatkovannia. Bezpeka ta ekspluatatsiini kharakterystyky* [Fire and rescue vehicles. Part 3. Permanently installed equipment. Safety and performance characteristics]. (2019). DSTU EN 1846-3:2018 from 10th October 2019. Kyiv: DP UkrNDNTs [in Ukrainian].
9. *Protypozhezhna tekhnika. Terminy ta vyznachennia osnovnykh poniat* [Fire fighting equipment. Terms and definitions of basic concepts]. (2006). DSTU 2273:2006 from 1st April 2007. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy [in Ukrainian].
10. *Vysotni drabyny dlia pozhezhnoi sluzhby – Povorotni drabyny z kombinovanymy rukhamy – Vymohy do bezpeky ta robochykh kharakterystyk i metody vyprobuvan* [High rise aerial appliances for fire service use – Turntable ladders with combined movements – Safety and performance requirements and test methods]. (2014). EN 14043:2014 from 31st July 2014. Belgium: CEN [in English].
11. *Pozhezhna tekhnika. Avtomobili hasinnia. Zahalni tekhnichni umovy* [Fire fighting equipment. Extinguishing vehicles. General technical conditions]. (1996). DSTU 3286-95 from 1st January 1997. Kyiv: DP UkrNDNTs [in Ukrainian].

ON DETERMINING WORLDWIDE APPROACHES TO CLASSIFICATION REQUIREMENTS FOR FIRE AND EMERGENCY RESCUE VEHICLES

S. Semychaievskyi[1], V. Prisyazhnuk[2], M. Yakimenko[1], M. Osadchuk[1], V. Svirskyi[1], K. Bielikova[1]

[1]Institute of Scientific Research on Civil Protection of the National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine
[2]Institute of Public Administration and Research in Civil Protection, Ukraine

KEYWORDS:

experimental studies, fire extinguishers, non-standardized combined fires, rationale wheeled vehicles

ABSTRACT

The relevance of the issue of improving the national regulatory framework for classification requirements for fire and rescue vehicles is determined. The national standards of Ukraine and EU countries that establish classification requirements for fire and rescue vehicles are analyzed. It is established that fire trucks are divided into: fire and rescue vehicles (fire trucks with pumping equipment, special-purpose vehicles), car lifts (rotary ladders, hydraulic platforms), rescue vehicles, medical fire trucks, emergency response vehicles, headquarters vehicles, vehicles for the transportation of personnel, auxiliary vehicles, and fire trucks for other purposes. The article identifies differences in the classification by type of fire truck depending on the main type of application in Ukraine and the EU countries. The general view of fire trucks of various types that correspond to the European classification is given. The European classification by weight of vehicles with a gross vehicle weight in the equipped state of more than 3 tons is indicated. The following categories of fire trucks are presented, depending on their ability to move on or off-road, namely: category 1 (urban) - vehicles usually used for driving on the surfaces of constructed roads (category 1 vehicles usually have one drive axle); category 2 (rural) - vehicles capable of moving on any road, with limited ability to move off-road; category 3 (all-terrain) - vehicles capable of moving on any road and off-road. The article identifies the shortcomings of global approaches to classification requirements for fire and rescue vehicles. It is noted that currently in Ukraine and the EU countries there are different approaches to the designation of fire trucks. Relevant examples of fire truck designation in accordance with national and European regulatory documentation are given. The author emphasizes that today the requirements of the national standard establishing general technical conditions for firefighting vehicles are outdated and do not meet the requirements of today; namely, the standard is focused on the manufacture of outdated models of firefighting vehicles; therefore, it hinders technical progress in the industry and contains low requirements for their model range.

УДК 614.841.45

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ НА СПІВВІДНОШЕННЯ НЕОБХІДНОЇ МІНІМАЛЬНОЇ ТОВЩИНИ ПАСИВНИХ СИСТЕМ ВОГНЕЗАХИСТУ ЗА РІЗНИМИ НОМІНАЛЬНИМИ ТЕМПЕРАТУРНИМИ РЕЖИМАМИ ПОЖЕЖІ

https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.1.(19).53-64

Новак С. В.[1]*, ORCID iD 0000-0001-7087-318X
Пустовий М. М.[2], ORCID iD 0000-0003-1434-4296
*E-mail: novak.s.fire@gmail.com

[1]*Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України, Україна*
[2]*Національний університет цивільного захисту України, Україна*

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 28.04.2025
Пройшла рецензування: 10.05.2025

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

вогнестійкість, вогнезахисне покриття, коефіцієнт перерізу, критична температура, проміжок часу, система вогнезахисту, температурний режим, товщина, співвідношення, сталева конструкція

АНОТАЦІЯ

Недостатня визначеність даних щодо співвідношення між значеннями необхідної мінімальної товщини систем вогнезахисту сталевих конструкцій за різними номінальними температурними режимами пожежі стримує застосування цих систем для сценаріїв умовної пожежі, які передбачають вогневий вплив, який відрізняється від стандартного температурного режиму, зазначеного в EN 1363-1.

Проведене дослідження ставило за мету виявлення залежностей співвідношення між значеннями необхідної мінімальної товщини пасивної системи вогнезахисту певної торгової марки за температурними режимами вуглеводневої та зовнішньої пожеж згідно з EN 1363-2 і стандартного температурного режиму згідно з EN 1363-1 від параметрів сталевих конструкцій – їхнього коефіцієнта поперечного перерізу, критичної температури і проміжку часу збереженості вогнестійкості.

За методом, який ґрунтується на положеннях EN 13381-4 і ДСТУ Б В.1.1-17, визначено таке співвідношення (відсоткову різницю) для пасивного вогнезахисного покриття, створеного з вермикуліто-цементних плит торгової марки «Ендотерм 210104», для сталевих конструкцій, які мають такі параметри: коефіцієнт поперечного перерізу від 40 $м^{-1}$ до 300 $м^{-1}$, критичну температуру від 350 °С до 700 °С і проміжок часу збереженості вогнестійкості від 30 хв до 240 хв. Встановлено, що величина цієї різниці, залежно від параметрів сталевої конструкції, за температурного режиму вуглеводневої пожежі змінюється від 7 % до 239 %, а за температурного режиму зовнішньої пожежі – від 6 % до 54 %. Як для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі так і зовнішньої пожежі із підвищенням коефіцієнта поперечного перерізу величина різниці зменшується, а із підвищенням критичної температури збільшується. За температурного режиму вуглеводневої пожежі підвищення проміжку часу збереженості вогнестійкості призводить до суттєвого зменшення величини різниці. За температурного режиму зовнішньої пожежі з підвищенням цього проміжку часу величина різниці збільшується, проте вплив проміжку часу на різницю не такий значний, як за температурного режиму вуглеводневої пожежі.

Постановка проблеми. Застосування профільованих і коробчастих систем вогнезахисту, створених з пасивних вогнезахисних матеріалів, забезпечує вогнестійкість сталевих конструкцій у всьому діапазоні нормованого проміжку часу збереженості їхньої несучої здатності, регламентованому в EN 13501-2 [1]. У джерелах інформації, зокрема в [2; 3], подано дані щодо мінімальної товщини систем [4; 5] з використанням штукатурних вогнезахисних покриттів, плит, панелей та матів, необхідної для забезпечення нормованої вогнестійкості сталевих конструкцій. Переважну кількість цих даних отримано шляхом випробувань,

виконаних за методом, який наведено в EN 13381-4 [6] і передбачає вогневий вплив на конструкції за стандартного температурного режиму згідно з EN 1363-1 [7]. Проте EN 1991-1-2 [8] визначає інші номінальні температурні режими пожежі, застосовні для оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій, – температурні режими вуглеводневої і зовнішньої пожеж згідно з EN 1363-2 [9]. За цими температурними режимами значення необхідної мінімальної товщини систем вогнезахисту сталевих конструкцій будуть іншими ніж за стандартного температурного режиму [10], і користувачам вогнезахисних матеріалів для визначення параметрів систем вогнезахисту доцільно мати дані щодо співвідношення цієї товщини за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожеж із товщиною за стандартного температурного режиму.

Для встановлення залежностей щодо цього співвідношення, прийнятних для інженерних розрахунків, можуть бути використані результати розрахункових і експериментальних досліджень, наведені в роботах [10; 11]. Однак невизначеними є дані щодо зазначеного співвідношення для пасивних систем вогнезахисту конкретних торгових марок і сталевих конструкцій, які мають широкий діапазон змінювання їхніх параметрів (коефіцієнта поперечного перерізу, критичної температури і проміжку часу збереженості вогнестійкості). Тому є підстави вважати за актуальні дослідження, спрямовані на виявлення впливу параметрів сталевих конструкцій на зазначене співвідношення для систем вогнезахисту, створених із пасивних вогнезахисних матеріалів, – штукатурок, плит, панелей і матів [5; 6].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Незахищені сталеві конструкції зберігають свою несучу здатність (за критичної температури 500 ◦С) протягом проміжку часу до 25 хвилин для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму згідно з EN 1363-1 та 10 і 35 хвилин за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожеж згідно з EN 1363-2 [12; 13]. Враховуючи те, що тривалість вогневого впливу на ці конструкції під час пожежі згідно з EN 13501-2 може бути більшою, для сталевих конструкцій зазвичай використовують пасивні й реактивні системи вогнезахисту [14; 15].

Пасивні системи вогнезахисту часто містять водонасичені наповнювачі, такі як гіпс, вермикуліт і перліт [4; 5]. Інтенсивне випаровування цієї води під час вогневого впливу уповільнює нагрівання металевого елемента сталевої конструкції. Завдяки цьому такі системи вогнезахисту, на відміну від реактивних систем [16], забезпечують збереженість несучої здатності сталевих конструкцій протягом тривалого часу вогневого впливу, який може досягати 240 хвилин і більше [12; 14; 15].

В роботах [12; 13; 17; 18] наведено дані щодо співвідношення проміжків часу збереженості несучої здатності (вогнестійкості) захищених сталевих конструкцій за різними номінальними температурними режимами пожежі, які подано в EN 1363-1 і EN 1363-2. Зокрема, в них розглянуто параметри, які впливають на це співвідношення, і зазначено, що різниця між значенням проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевої конструкції для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі і його значенням за стандартного температурного режиму може досягати 58 %, а за температурного режиму зовнішньої пожежі й стандартного температурного режиму – 108 %.

Відповідно до EN 13381-4 величина необхідної мінімальної товщини системи вогнезахисту сталевої конструкції залежить від її коефіцієнта поперечного перерізу, критичної температури, нормованого проміжку часу збереженості вогнестійкості і властивостей застосовного вогнезахисного матеріалу. В роботах [10; 11; 19] наведено дані щодо співвідношення цієї товщини за різними номінальними температурними режимами пожежі згідно з EN 1363-1 і EN 1363-2. Зокрема, в них зазначено, що різниця між значеннями цієї

товщини, отриманими для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі й стандартного температурного режиму, може досягати 214 %, а за температурного режиму зовнішньої пожежі й стандартного температурного режиму – 65 %. Ця різниця зменшується із підвищенням коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного матеріалу та коефіцієнта поперечного перерізу і збільшується із підвищенням критичної температури. Із підвищенням проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевої конструкції за температурного режиму вуглеводневої пожежі різниця зменшується, а за температурного режиму зовнішньої пожежі вона збільшується [10].

Підсумовуючи, слід зазначити, що наведені вище результати досліджень дозволяють оцінювати співвідношення щодо необхідної мінімальної товщини систем вогнезахисту сталевих конструкцій за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожеж і стандартного температурного режиму. Проте, в більшій частині, ці результати містять залежності цього співвідношення від коефіцієнта поперечного перерізу, критичної температури і проміжку часу збереженості вогнестійкості, які отримано розрахунковим методом для гіпотетичних вогнезахисних матеріалів, що мають сталі значення коефіцієнта теплопровідності й питомої об’ємної теплоємності [10]. Водночас теплофізичні властивості реалістичних вогнезахисних матеріалів не є сталими і залежать від низки параметрів, зокрема від температури [20]. Певні експериментально-розрахункові дані щодо цього співвідношення визначено для обмеженої кількості реактивних вогнезахисних матеріалів [11; 19]. Тому є підстави вважати, що недостатня визначеність співвідношення щодо необхідної мінімальної товщини пасивних систем вогнезахисту сталевих конструкцій за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожеж згідно з EN 1363-2 і стандартного температурного режиму згідно з EN 1363-1 обумовлює необхідність проведення досліджень в цьому напрямку.

Формулювання цілей дослідження. За мету дослідження ставилося виявлення залежностей співвідношення між значеннями необхідної мінімальної товщини пасивної системи вогнезахисту певної торгової марки за температурними режимами вуглеводневої та зовнішньої пожеж згідно з EN 1363-2 і стандартного температурного режиму згідно з EN 1363-1 від параметрів сталевих конструкцій – їхнього коефіцієнта поперечного перерізу, критичної температури і проміжку часу збереженості вогнестійкості.

Методи дослідження. Застосовано експериментальний метод визначення теплового стану зразків захищених сталевих конструкцій в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму та розрахункові методи ідентифікації теплофізичних властивостей вогнезахисного матеріалу шляхом розв’язання оберненої задачі теплопровідності, визначення температури захищених сталевих конструкцій у різні проміжки часу вогневого впливу шляхом розв’язання прямої задачі теплопровідності та розв’язання задачі оптимізації для визначення необхідної мінімальної товщини системи вогнезахисту.

Виклад основного матеріалу. Для дослідження застосовано одношарову пасивну систему вогнезахисту (далі – вогнезахисне покриття) з вермикуліто-цементних плит «Ендотерм 210104» [3]. Для визначення співвідношення між значеннями необхідної мінімальної товщини системи вогнезахисту за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожеж згідно з EN 1363-2 і за стандартного температурного режиму згідно з EN 1363-1 застосовано метод, який наведено в роботі [21]. Цей метод засновано на положеннях EN 13381-4 і ДСТУ Б В.1.1-17 [22]. Його сутність полягає в експериментальному визначенні теплового стану навантажених і ненавантажених зразків захищених

сталевих конструкцій в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму, визначенні за отриманими експериментальними даними щодо температури зразків теплофізичних властивостей вогнезахисного матеріалу (далі – вогнезахисного покриття), розрахунку значень необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття за різними номінальними температурними режимами пожежі й співвідношення між ними для широкого діапазону параметрів сталевої конструкції.

У табл. 1 наведено параметри експериментальних зразків – ненавантажених коротких колон заввишки 1000 мм, навантажених балок завдовжки 4700 мм і ненавантажених балок для порівняння завдовжки 1000 мм, для яких в експерименті визначено температуру $\theta_{a,exp}$ їхньої металевої поверхні (під шаром вогнезахисного покриття) у різні проміжки часу вогневого впливу за стандартного температурного режиму.

Таблиця 1 – Параметри експериментальних зразків

№ зразка	Вид конструкції	Типорозмір профілю	Коефіцієнт поперечного перерізу A_p/V, м$^{-1}$	Товщина покриття d_p, мм
1	Коротка колона	IPE 200	226,77	60,40
2	Коротка колона	IPE 200	226,77	40,20
3	Коротка колона	HEA 200	158,68	60,80
4	Коротка колона	HEA 200	158,68	40,40
5	Коротка колона	HEA 200	158,68	19,30
6	Коротка колона	HEA 300	113,43	40,80
7	Коротка колона	HEA 300	113,43	20,80
8	Коротка колона	HEB 300	86,74	20,30
9	Коротка колона	HEB 450	73,73	40,20
10	Коротка колона	HEM 280	53,13	19,8
11	Навантажена балка	IPE 400	122,35	20,2
12	Навантажена балка	IPE 400	122,35	41,0
13	Балка для порівняння	IPE 400	122,35	20,0
14	Балка для порівняння	IPE 400	122,35	40,8

За отриманими експериментальними даними щодо температури зразків $\theta_{a,exp}$ визначено їхні значення проміжку часу t_{exp} до досягнення критичної температури, які наведено в табл. 2. Порівнюючи показники щодо проміжків часу t_{exp} на навантажених балках (зразки № 11, № 12) з показниками, отриманими з використанням ненавантажених балок (зразки № 13, № 14), згідно з додатком D EN 13381-4 визначено кориговані значення проміжку часу t_c до досягнення критичної температури коротких колон (зразки № 1–10), з урахуванням показників вогнезахисного покриття щодо його «здатності до зчеплення», які також подано в табл. 2. Із використанням даних щодо температури $\theta_{a,exp}$, отриманих для коротких колон (зразків № 1–10), і їхніх коригованих проміжків часу t_c, за процедурою, заснованою на розв'язанні оберненої задачі теплопровідності й положеннях, наведених в додатку Л ДСТУ Б В.1.1-17 [22], додатку П.2 ДСТУ-Н Б В.2.6-211 [23], додатку E EN 13381-4 і роботах [21; 24], визначено теплофізичні властивості застосовного в експериментальних зразках вогнезахисного покриття – його коефіцієнт теплопровідності λ_p і питому об'ємну теплоємність $c_p\rho_p$ залежні від температури.

Таблиця 2 – Значення проміжків часу t_{exp} і t_c

Критична температура θ_{cr}, °C	350	400	450	500	550	600	650	700
№ зразка	Проміжки часу t_{exp}/t_c, хв							
1	213/213	224/224	236/236	249/249	261/261	272/268	286/272	–
2	108/108	115/115	123/123	131/131	139/139	148/142	159/146	173/151
3	239/239	252/252	266/266	281/281	295/295	–	–	–
4	120/120	129/129	138/138	148/148	158/157	169/162	182/167	197/173
5	51/ 51	56/ 56	60/ 59	65/ 63	71/ 66	78/ 70	85/ 74	95/ 85
6	142/142	153/153	165/165	178/178	191/190	206/197	224/204	243/211
7	66/ 66	73/ 73	81/ 80	90/ 85	99/ 91	110/97	122/104	137/112
8	73/ 73	82/ 82	91/ 90	101/96	112/102	124/109	138/117	154/127
9	165/165	180/180	196/196	213/213	230/229	249/237	263/246	275/253
10	96/ 96	108/108	121/119	134/127	149/135	165/144	–	–
11	70	75	80	85	90	96	104	113
12	149	159	167	175	181	187	193	199
13	65	73	80	88	98	109	122	137
14	137	148	159	170	182	195	210	226

При цьому на першому етапі шляхом розв'язання оберненої задачі теплопровідності із застосуванням комп'ютерної програми FRIEND [24] визначали такі значення λ_p і $c_p\rho_p$ у вузлових точках їхніх кусково-лінійних залежностей від температури, за яких середньоквадратичний відхил F розрахункових $\theta_{a,calc}$ від експериментальних $\theta_{a,exp}$ значень температури коротких колон є мінімальний. Отримані результати щодо коефіцієнта теплопровідності λ_p і питомої об'ємної теплоємності $c_p\rho_p$ наведено в табл. 3 і 4. Для цього розв'язку величина відхилу F становить 10,7 °C.

Таблиця 3 – Значення λ_p і $\lambda_{p,c}$ у вузлових точках

Номер вузлової точки i	1	2	3	4
Температура вузлової точки $\theta_{p,i}$, °C	0	400	800	1200
Коефіцієнт теплопровідності λ_p, Вт/(м·°C)	0,543	0,156	0,259	0,425
Коефіцієнт теплопровідності $\lambda_{p,c}$, Вт/(м·°C)	0,546	0,159	0,262	0,428

Таблиця 4 – Значення $c_p\rho_p$ у вузлових точках

Номер вузлової точки i	1	2	3	4	5	6
Температура вузлової точки $\theta_{p,i}$, °C	0	95	98	104	110	1200
Питома об'ємна теплоємність $c_p\rho_p$, МДж/(м^3·°C)	1,0	1,0	80,0	80,0	1,0	1,0

На другому етапі визначали прийнятність отриманого розв'язку, виходячи з таких вимог (критеріїв прийнятності) [6]:

a) для кожної короткої колони жоден розрахунковий проміжок часу t_{calc} до досягнення критичної температури, визначений для отриманого розв'язку оберненої задачі теплопровідності, не повинен перевищувати коригованого проміжку часу t_c більше ніж на 15 %;

b) середнє значення всіх відсоткових відмінностей розрахункових від коригованих проміжків часу, визначених

для кожної короткої колони, має бути меншим за нуль;

с) більшим за нуль мають бути не більше ніж 30 % окремих значень усіх відсоткових відмінностей розрахункових від коригованих проміжків часу, визначених для кожної короткої колони.

Ураховуючи те, що отриманий розв'язок оберненої задачі теплопровідності не задовольнив вимозі b), було здійснено коригування значень коефіцієнта теплопровідності λ_p у вузлових точках, наведених в табл. 3, користуючись такою формулою:

$$\lambda_{p,c}(\theta_{p,i}) = \lambda_p(\theta_{p,i}) + K\lambda_{sp}, \quad (1)$$

де $\lambda_{p,c}(\theta_{p,i})$ – кориговане значення коефіцієнта теплопровідності в i-ій вузловій точці за температури $\theta_{p,i}$;

$\lambda_p(\theta_{p,i})$ – значення коефіцієнта теплопровідності в i-ій вузловій точці за температури $\theta_{p,i}$, визначене шляхом розв'язання оберненої задачі теплопровідності;

$\theta_{p,i}$ – температура i-ої вузлової точки;

i – номер вузлової точки, i = 1, 2,…, n, де n – кількість вузлових точок (відповідно до табл. 3 n = 4);

K – коефіцієнт;

λ_{sp} – відхил, значення якого обчислювали за такою формулою:

$$\lambda_{sp} = \sum_{i=1}^{n} \lambda_p(\theta_{p,i}) / 10n. \quad (2)$$

Для цього коригування було застосовано ітераційну процедуру, яку наведено в [21]. Отримані кориговані значення коефіцієнта теплопровідності $\lambda_{p,c}$ у вузлових точках наведено в табл. 3.

Користуючись коригованими величинами коефіцієнта теплопровідності $\lambda_{p,c}$ і значеннями питомої об'ємної теплоємності $c_p\rho_p$, які подано в табл. 3, 4, за процедурою, наведеною в [10; 21], визначали значення необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття за стандартного температурного режиму та температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожеж для сталевих конструкцій, які мають широкий діапазон їхніх параметрів – коефіцієнта поперечного перерізу ($(A_p/V)_{min}$ = 40 м$^{-1}$; $(A_p/V)_{med}$ = 150 м$^{-1}$; $(A_p/V)_{max}$ = 300 м$^{-1}$), критичної температури ($\theta_{cr,min}$ = 350 °C; $\theta_{cr,med}$ = 500 °C; $\theta_{cr,max}$ = 700 °C) і проміжку часу збереженості вогнестійкості ($t_{fr,min}$ = 30 хв; $t_{fr,med}$ = 120 хв; $t_{fr,max}$ = 240 хв). За формулами (3) і (4) розраховано відсоткові різниці (далі – різниці) між значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожеж і значеннями цієї товщини за стандартного температурного режиму. Отримані розрахункові дані подано в табл. 5, 6. Прочерки в табл. 6 пов'язані з тим, що для температурного режиму зовнішньої пожежі сталева конструкція не може досягнути температури 700 °C через те, що максимальне значення температури газового середовища для цього режиму згідно з EN 1363-2 складає 680 °C.

$$\delta_{d,HC} = 100(d_{p,min,HC} - d_{p,min})/d_{p,min}; \quad (3)$$

$$\delta_{d,ef} = 100(d_{p,min,ef} - d_{p,min})/d_{p,min}, \quad (4)$$

де $\delta_{d,HC}$ – різниця між значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття за температурного режиму вуглеводневої пожежі і стандартного температурного режиму, %;

$\delta_{d,ef}$ – різниця між значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття за температурного режиму зовнішньої пожежі і стандартного температурного режиму, %;

$d_{p,min,HC}$ і $d_{p,min,ef}$ – значення необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожеж, мм;

$d_{p,min}$ – значення необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття за стандартного температурного режиму, мм.

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

A_p/V, $м^{-1}$	Значення $\delta_{d,HC}$ (%) 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	113	223	–	26,5	33,0	49,3	8,43	11,4	12,5
150	73,8	99,3	239	19,0	23,6	33,3	7,39	7,84	9,13
300	50,0	75,2	154	14,9	18,7	23,8	7,18	7,68	8,49

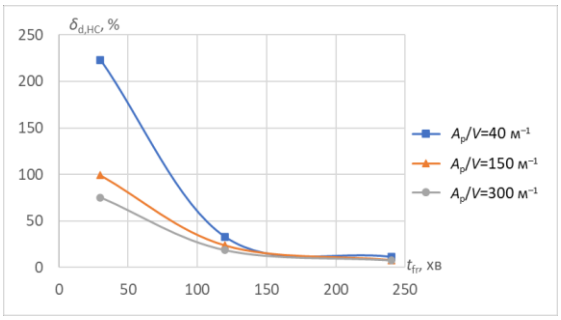
Таблиця 6 – Дані щодо різниці $\delta_{d,ef}$

A_p/V, $м^{-1}$	Значення $\delta_{d,ef}$ (%) 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	–29,1	–51,2	–	–34,6	–52,8	–	–37,8	–53,7	–
150	–9,02	–27,4	–	–21,0	–31,6	–	–25,0	–35,1	–
300	–5,63	–22,0	–	–19,8	–26,7	–	–22,5	–30,9	–

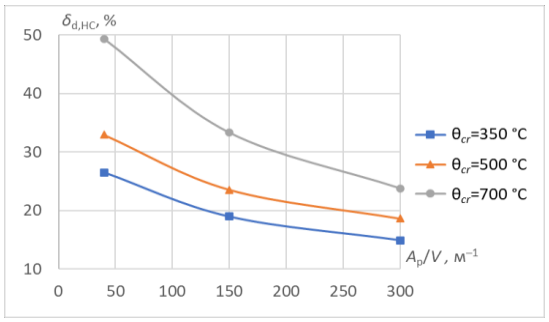
Із аналізу даних, наведених в табл. 5, можна зазначити, що різниця $\delta_{d,HC}$ між значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття за температурного режиму вуглеводневої пожежі і стандартного температурного режиму залежить від коефіцієнта поперечного перерізу A_p/V, критичної температури θ_{cr} та проміжку часу збереженості вогнестійкості t_{fr} і змінюється в діапазоні від 7,18 % до 239 %. Із підвищенням t_{fr} та A_p/V різниця зменшується. Підвищення θ_c призводить до її збільшення. Найбільший вплив на величину різниці має проміжок часу t_{fr}. Найбільші значення (від 50,0 % до 239 %) різниця має для проміжку часу 30 хв, найменші (від 7,18 % до 12,5 %) – для 240 хв. Вплив коефіцієнта поперечного перерізу і критичної температури на різницю є значним для проміжку часу 30 хв, а з підвищенням цього проміжку часу він слабкіший. Зокрема, за $\theta_{cr,med}$ = 500 °С із підвищенням проміжку часу від 30 хв до 240 хв різниця зменшується: від 223 % до 11,4 % – за $(A_p/V)_{min}$ = 40 $м^{-1}$; від 99,3 % до 7,84 % – за $(A_p/V)_{med}$ = 150 $м^{-1}$; від 75,2 % до 7,68 % – за $(A_p/V)_{max}$ = 300 $м^{-1}$ (рис. 1а). За $t_{fr,med}$ = 120 хв із підвищенням коефіцієнта поперечного перерізу від 40 $м^{-1}$ до 300 $м^{-1}$ різниця зменшується: від 26,5 % до 14,9 % – за $\theta_{cr,min}$ = 350 °С; від 33,0 % до 18,7 % – за $\theta_{cr,med}$ = 500 °С; від 49,3 % до 23,8 % – за $\theta_{cr,max}$ = 700 °С (рис. 1б). За $(A_p/V)_{med}$ = 150 $м^{-1}$ із підвищенням критичної температури від 350 °С до 700 °С різниця збільшується: від 73,8 % до 239 % – за $t_{fr,min}$ = 30 хв; від 19,0 % до 33,3 % – за $t_{fr,med}$ = 120 хв; від 7,39 % до 9,13 % – за $t_{fr,max}$ = 240 хв (рис. 1в).

Із аналізу даних, поданих в табл. 6, випливає, що різниця $\delta_{d,ef}$ між значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття за температурного режиму зовнішньої пожежі і стандартного температурного режиму, також як і різниця $\delta_{d,HC}$ залежить від коефіцієнта поперечного перерізу A_p/V, критичної температури θ_{cr} та проміжку часу збереженості вогнестійкості t_{fr} і змінюється в діапазоні від –5,63 % до –53,7 %. Із підвищенням t_{fr} та θ_{cr} і зменшенням A_p/V різниця $\delta_{d,ef}$ (за модулем) збільшується. Зокрема, за $\theta_{cr,med}$ = 500 °С із підвищенням проміжку часу від 30 хв до 240 хв величина різниці збільшується: від 51,2 % до 53,7 % – за $(A_p/V)_{min}$ = 40 $м^{-1}$; від 27,4 % до 35,1 % – за $(A_p/V)_{med}$ = 150 $м^{-1}$; від 22,0 % до 30,9 % – за $(A_p/V)_{max}$ = 300 $м^{-1}$ (рис. 2а). За $t_{fr,med}$ = 120 хв із підвищенням коефіцієнта поперечного перерізу від 40 $м^{-1}$ до 300 $м^{-1}$ величина різниці зменшується: від 34,6 % до 19,8 % – за $\theta_{cr,min}$ = 350 °С; від 52,8 % до 26,7 % – за $\theta_{cr,med}$ = 500 °С (рис. 2б). За $(A_p/V)_{med}$ = 150 $м^{-1}$ із підвищенням критичної температури від 350 °С до 500 °С величина різниці збільшується: від 9,02 % до 27,4 % – за

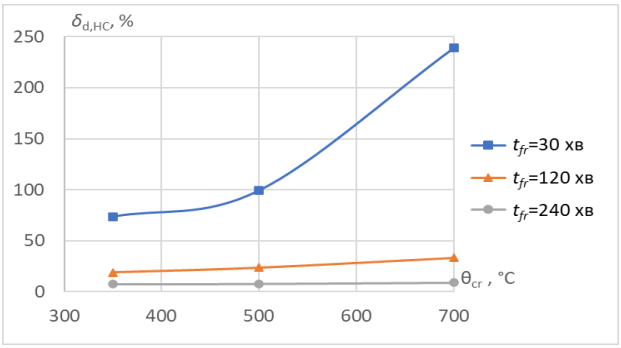
$t_{fr,min}$ = 30 хв; від 21,0 % до 31,6 % – за $t_{fr,med}$ = 120 хв; від 25,0 % до 35,1 % – за $t_{fr,max}$ = 240 хв (рис. 2в).



а

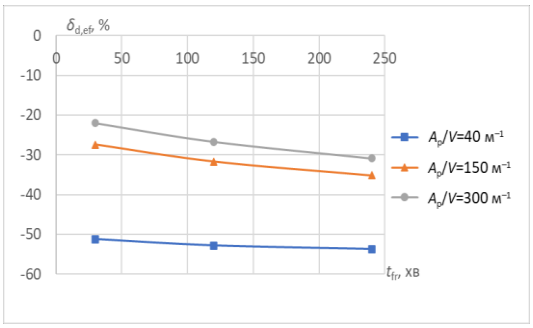


б

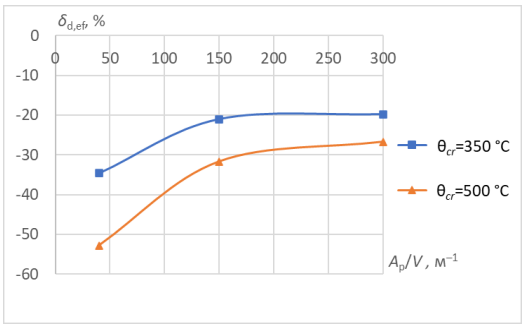


в

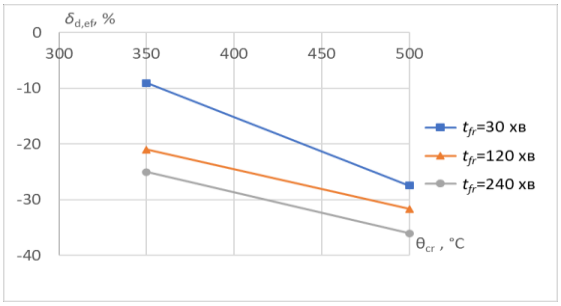
Рисунок 1 – Залежності різниці $\delta_{d,HC}$ від проміжку часу t_{fr} (а), коефіцієнта поперечного перерізу A_p/V (б) і критичної температури θ_{cr} (в)



а



б



в

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

За отриманими результатами випливає, що величина різниці між необхідною мінімальною товщиною пасивного вогнезахисного покриття «Ендотерм 210104» за різними номінальними температурними режимами пожежі, як для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі так і зовнішньої пожежі, із підвищенням коефіцієнта поперечного перерізу зменшується, а з підвищенням критичної температури збільшується. На величину цієї різниці також впливає значення проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевої конструкції. Підвищення цього проміжку часу за температурного режиму вуглеводневої пожежі призводить до суттєвого зменшення величини різниці. За температурного режиму зовнішньої пожежі з підвищенням проміжку часу збереженості вогнестійкості величина різниці збільшується, але вплив цього проміжку часу на різницю не такий значний, як за температурного режиму вуглеводневої пожежі. Такий вплив проміжку часу збереженості вогнестійкості на величину зазначеної різниці обумовлений відмінністю у рівнях теплового впливу на сталеву конструкцію, які мають місце за умов різних номінальних температурних режимів пожежі [10].

Отримані результати дослідження можуть вважатися за доцільні з практичної точки зору, тому що дозволяють обґрунтовано підходити до оцінювання необхідної мінімальної товщини пасивного вогнезахисного покриття, призначеного для сталевих конструкцій, для умов вогневого впливу за номінальними температурними режимами пожежі, які відмінні від стандартного. З теоретичної точки зору вони дозволяють стверджувати про визначеність впливу параметрів сталевих конструкцій на співвідношення між значеннями необхідної мінімальної товщини пасивного вогнезахисного покриття за температурними режимами вуглеводневої та зовнішньої пожеж і стандартного температурного режиму, що є певними перевагами проведеного дослідження. Однак неможливо не відмітити, що результати цього дослідження отримано тільки для одного пасивного вогнезахисного покриття певної торгової марки. Зазначене може призвести до наявності відмінностей в отриманих результатах стосовно співвідношення необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття за різними номінальними температурними режимами пожежі.

Ця невизначеність накладає певні обмеження на застосування здобутих результатів, що може трактуватися, як недоробки проведеного дослідження. Неможливість усунути зазначені обмеження в межах цього дослідження зумовлює потенційно цікавий напрямок для подальших досліджень. Вони можуть бути орієнтовані на виявлення впливу параметрів сталевих конструкцій на зазначене співвідношення щодо систем вогнезахисту, створених із таких пасивних вогнезахисних матеріалів, як штукатурки, панелі та мати, а також на визначення спрощених залежностей для цього співвідношення, які прийнятні для інженерних розрахунків.

Висновки та напрями подальших досліджень. Проведеним дослідженням виявлено залежності співвідношення (відсоткової різниці) між значеннями необхідної мінімальної товщини пасивного вогнезахисного покриття, створеного з вермикуліто-цементних плит торгової марки «Ендотерм 210104», за температурними режимами вуглеводневої та зовнішньої пожеж згідно з EN 1363-2 і стандартного температурного режиму згідно з EN 1363-1 від параметрів сталевих конструкцій – їхнього коефіцієнта поперечного перерізу, критичної температури і проміжку часу збереженості вогнестійкості.

Встановлено, що для діапазонів змінювання параметрів сталевих конструкцій, які становлять для коефіцієнта поперечного перерізу від 40 $м^{-1}$ до 300 $м^{-1}$, для критичної температури від 350 °С до 700 °С і для

проміжку часу збереженості вогнестійкості від 30 хв до 240 хв, величина цієї різниці за температурного режиму вуглеводневої пожежі змінюється від 7 % до 239 %, а за температурного режиму зовнішньої пожежі – від 6 % до 54 %. Величина різниці, як для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі так і зовнішньої пожежі, з підвищенням коефіцієнта поперечного перерізу зменшується, а з підвищенням критичної температури збільшується. За температурного режиму вуглеводневої пожежі підвищення проміжку часу збереженості вогнестійкості призводить до суттєвого зменшення величини різниці. За температурного режиму зовнішньої пожежі з підвищенням цього проміжку часу величина різниці збільшується, проте вплив проміжку часу на різницю не такий значний, як за температурного режиму вуглеводневої пожежі. Зокрема, за критичної температури 500 °С і коефіцієнта поперечного перерізу 150 $м^{-1}$ із підвищенням проміжку часу від 30 хв до 240 хв величина різниці зменшується від 99 % до 8 % за температурного режиму вуглеводневої пожежі та збільшується від 27 % до 35 % за температурного режиму зовнішньої пожежі.

Визначено напрями подальших досліджень, які орієнтовані на виявлення впливу параметрів сталевих конструкцій на співвідношення необхідної мінімальної товщини за температурними режимами вуглеводневої та зовнішньої пожеж згідно з EN 1363-2 і стандартного температурного режиму згідно з EN 1363-1 щодо систем вогнезахисту, створених із таких пасивних вогнезахисних матеріалів, як штукатурки, панелі та мати, а також на визначення спрощених залежностей для цього співвідношення, які прийнятні для інженерних розрахунків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. EN 13501-2:2016 Fire classification of construction products and building elements – Part 2: Classification using data from fire resistance tests, excluding ventilation services. CEN-CENELEC Management Centre: Rue de la Science 23, B-1040 Brussels. 2016 *CEN*. 79 p.
2. Yellow book: Fire protection for structural steel in buildings 4 edition. *Association for Specialist Fire Protection*. 2013. https://asfp.org.uk.
3. Калафат К., Вахитова Л. *Аналитический обзор средств огнезащиты стальных конструкций 2021–2022*. Украинский центр стального производства, 2022. 230 с.
4. EAD 350140-00-1106 Renderings and rendering kits intended for fire resistant applications. *EOTA* 2017. 48 p.
5. EAD 350142-00-1106 Fire protective board, slab and mat products and kits. *EOTA* 2017. 60 p.
6. 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.
7. 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.
8. EN 1991-1-2:2002/AC:2013 Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire. European committee for standardization. Central ecretariat: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2004 *CEN*. 61 p.
9. EN 1363-2:1999 Fire resistance tests – Part 2: Alternative and additional procedures. Central Secretariat: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 1999. *CEN*. 16 p.
10. Новак С., Добростан О., Пустовий М. Вплив температурного режиму пожежі на необхідну мінімальну товщину вогнезахисних покриттів для сталевих конструкцій. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2022. № 2 (14). С. 5–20.
11. Новак С., Пустовий М. Співвідношення необхідної мінімальної товщини вогнезахисних покриттів сталевих конструкцій за різними номінальними температурними режимами пожежі. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2024. № 2 (14). С. 63–74.
12. Gravit M., Dmitriev I., Shcheglov N., Radaev A. Oil and gas structures: Forecasting the fire resistance of steel structures with fire protection under hydrocarbon fire conditions. *Fire*. 2024. Vol. 7. P. 173–196. https://doi.org/10.3390/fire7060173.
13. Новак С., Добростан 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. Randaxhe J., Popa N., Vassart O., Tondini N. Development of a plug-and-play fire protection system for steel columns. *Fire Saf. J.* 2021. Vol. 121. P. 103272.
15. Diaconu B., Cruceru M., Anghelescu L. Fire retardance methods and materials for phase change materials: performance, integration methods, and applications — A literature review. *Fire.* 2023. Vol. 6. P. 175.
16. EAD 350402-00-1106 Reactive coatings for fire protection of steel elements. EOTA 2017. 32 p.
17. Fireproofing for hydrocarbon fire exposures//GAPS Guidelines. *Publication of Global Asset Protection Services LLC*. 2000. https://www.appliedbuildingtech.com/system/files/gap2.5.1.fireproofingforhydrocarbonexposures.pdf.
18. AXA XL Risk consulting. *GAPS*© 2020. Available online: https://axaxl.com/-/media/axaxl/files/pdfs/prc-guidelines/prc-2/prc251fireproofingforhydrocarbonfireexposuresv1.pdf.

19. Ковальов А., Зобенко Н. Методика попередньої оцінки вогнезахисної здатності покриттів для сталевих конструкцій в умовах температурного режиму вуглеводневої пожежі. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2016. № 1 (1). С. 59–65.
20. Круковский П., Новак С., Поклонский В., Еременко С., Фролов Г. *Оценка огнестойкости металлических строительных конструкций и огнезащитной способности покрытий (расчетно-экспериментальный подход)*: коллективная монография. Киев: ТОВ ”Франко Пак”. 2021. 148 с.
21. Пустовий М., Маладика І., Новак С. Оцінювання співвідношення необхідної мінімальної товщини вогнезахисту сталевих конструкцій за різними номінальними температурними режимами пожежі. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація.* 2024. Том 8, № 2. С. 104–120.
22. ДСТУ Б В.1.1-17:2007 (ENV 13381-4:2002, NEQ) Захист від пожежі. Вогнезахисні покриття для будівельних несучих металевих конструкцій. Метод визначення вогнезахисної здатності. Київ: *Мінрегіонбуд України*. 2008. 65 с.
23. ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016 Проектування сталевих конструкцій. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість. Київ: *Мінрегіон України*. 2016. 111 с.
24. Krukovsky P. Concerning a possibility of solution of inverseand optimization heat-transfer and fluid flow problems using PHOENICS and software FRIEND. *The PHOENICS Jornal of Computational Fluid Dinamics & its applications*. 1996. Vol. 9. № 4. P. 516–532.

REFERENCES

1. EN 13501-2:2016 Fire classification of construction products and building elements – Part 2: Classification using data from fire resistance tests, excluding ventilation services. CEN-CENELEC Management Centre: Rue de la Science 23, B-1040 Brussels. 2016 CEN. 79 p. [in English].
2. Yellow book: Fire protection for structural steel in buildings 4 edition. Association for Specialist Fire Protection. 2013. https://asfp.org.uk [in English].
3. Kalafat K., Vakhitova L. Analiticheskii obzor sredstv ognezashchiti stalnikh konstruktsii 2021–2022 [Analytical review of fire protection means for steel structures 2021–2022]. Ukrainskii tsentr stalnogo proizvodstva. 2022. 200 s. [in Russian].
4. EAD 350140-00-1106 Renderings and rendering kits intended for fire resistant applications. EOTA 2017. 48 p. [in English].
5. EAD 350142-00-1106 Fire protective board, slab and mat products and kits. EOTA 2017. 60 p. [in English].
6. 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].
7. 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].
8. EN 1991-1-2:2002/AC:2013 Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire. European committee for standardization. Central ecretariat: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2004 CEN. 61 p. [in English].
9. EN 1363-2:1999 Fire resistance tests – Part 2: Alternative and additional procedures. Central Secretariat: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 1999. CEN. 16 p. [in English].
10. Novak S., Dobrostan O., Pustovyi M. Vplyv temperaturnoho rezhymu pozhezhi na neobkhidnu minimalnu tovshchynu vohnezakhysnykh pokryttiv dlia stalevykh konstruktsii. Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka. 2022. № 2 (14). S. 5–20 [in Ukrainian].
11. Novak S., Pustovyi M. Spivvidnoshennia neobkhidnoi minimalnoi tovshchyny vohnezakhysnykh pokryttiv stalevykh konstruktsii za riznymy nominalnymy temperaturnymy rezhymamy pozhezhi. Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka. 2024. № 2 (14). S. 63–74 [in Ukrainian].
12. Gravit M., Dmitriev I., Shcheglov N., Radaev A. Oil and gas structures: Forecasting the fire resistance of steel structures with fire protection under hydrocarbon fire conditions. Fire. 2024. Vol. 7. P. 173–196. https://doi.org/10.3390/fire7060173 [in English].
13. Novak S., Dobrostan O., Pustovyi M. Vplyv temperaturnoho rezhymu pozhezhi na promizhok chasu zberezhenosti vohnestiikosti stalevykh konstruktsii. Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka. 2023. № 1 (15). S. 18–31 [in Ukrainian].
14. Randaxhe J., Popa N., Vassart O., Tondini N. Development of a plug-and-play fire protection system for steel columns. Fire Saf. J. 2021. Vol. 121. P. 103272 [in English].
15. Diaconu B., Cruceru M., Anghelescu L. Fire retardance methods and materials for phase change materials: performance, integration methods, and applications — A literature review. Fire. 2023. Vol. 6. P. 175 [in English].
16. EAD 350402-00-1106 Reactive coatings for fire protection of steel elements. EOTA 2017. 32 p. [in English].
17. Fireproofing for hydrocarbon fire exposures//GAPS Guidelines. Publication of Global Asset Protection Services LLC. 2000. https://www.appliedbuildingtech.com/system/files/gap2.5.1.fireproofingforhydrocarbonexposures.pdf [in English].
18. AXA XL Risk consulting. GAPS© 2020. Available online: https://axaxl.com/-/media/axaxl/files/pdfs/prc-guidelines/prc-2/prc251fireproofingforhydrocarbonfireexposuresv1.pdf [in English].
19. Kovalov A., Zobenko N. Metodyka poperednoi otsinky vohnezakhysnoi zdatnosti pokryttiv dlia stalevykh konstruktsii v umovakh temperaturnoho rezhymu vuhlevodnevoi pozhezhi. Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka. 2016. № 1 (1). S. 59–65 [in Ukrainian].
20. Krukovskij P., Novak S., Poklonskij V., Eremenko S., Frolov G. Oczenka ognestojkosti metallicheskikh stroitel`ny`kh konstrukczij i ognezashhitnoj sposobnosti pokry`tij (raschetno-e`ksperimental`ny`j podkhod): kollektivnaya monografiya. Kiev: Izdatel`stvo TOV ”Franko Pak”. 2021. 148 s. [in Russian].
21. Pustovyi M., Maladyka I., Novak S. Otsiniuvannia spivvidnoshennia neobkhidnoi minimalnoi tovshchyny vohnezakhystu stalevykh konstruktsii za riznymy nominalnymy temperaturnymy rezhymamy pozhezhi. Nadzvychaini sytuatsii: poperedzhennia ta likvidatsiia. 2024. Tom 8, № 2. S. 104–120 [in Ukrainian].
22. DSTU B V.1.1-17:2007 (ENV 13381-4:2002, NEQ) Zakhyst vid pozhezhi. Vohnezakhysni pokryttia dlia budivelnykh nesuchykh metalevykh konstruktsii. Metod vyznachennia vohnezakhysnoi zdatnosti. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy. 2008. 65 s. [in Ukrainian].
23. DSTU-N B V.2.6-211:2016 Proektuvannia stalevykh konstruktsii. Rozrakhunok konstruktsii na vohnestiikist. Kyiv: Minrehion Ukrainy. 2016. 111 s. [in Ukrainian].

24. Krukovsky P. Concerning a possibility of solution of inverseand optimization heat-transfer and fluid flow problems using PHOENICS and software FRIEND. The PHOENICS Jornal of Computational Fluid Dinamics & its applications. 1996. Vol. 9. № 4. P. 516–532 [in English].

INFLUENCE OF STEEL STRUCTURE PARAMETERS ON THE RATIO OF THE REQUIRED MINIMUM THICKNESS OF PASSIVE FIRE PROTECTION SYSTEMS FOR DIFFERENT NOMINAL FIRE TEMPERATURE-TIME CURVES

S. Novak[1], M. Pustovyi[2]

[1]Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Science of Ukraine, Ukraine
[2]National University of Civil Defense of Ukraine, Ukraine

KEYWORDS:

fire resistance, fire protection coating, cross-sectional coefficient, critical temperature, time interval, fire protection system, temperature-time curve, thickness, ratio, steel structure

ABSTRACT

Insufficient certainty of data on the relationship between the values of the required minimum thickness of fire protection systems for steel structures at different nominal fire temperature-time curves restricts the use of these systems for conditional fire scenarios that involve fire exposure that differs from the standard temperature-time curve specified in EN 1363-1. The study was aimed at identifying the dependencies between the values of the required minimum thickness of a passive fire protection system of a certain brand for the temperature-time curves of hydrocarbon and external fires in accordance with EN 1363-2 and the standard temperature-time curve in accordance with EN 1363-1 on the parameters of steel structures – their cross-sectional coefficient, critical temperature and fire resistance retention time. According to the method based on the provisions of EN 13381-4 and DSTU B V.1.1-17, the above ratio (percentage difference) was determined for a passive fire protection coating made of vermiculite-cement boards of the Endotherm 210104 trademark for steel structures with the following parameters: cross-sectional coefficient from 40 m^{-1} to 300 m^{-1}, critical temperature from 350 °C to 700 °C, and fire resistance retention time from 30 min to 240 min. It was found that the magnitude of this difference, depending on the parameters of the steel structure, varies from 7 % to 239 % under the temperature-time curve of a hydrocarbon fire, and from 6 % to 54 % under the temperature-time curve of an external fire. For both the conditions of fire exposure at the temperature-time curve of a hydrocarbon fire and an external fire, the difference decreases with an increase in the cross-sectional coefficient, and increases with an increase in the critical temperature. In the temperature-time curve of a hydrocarbon fire, an increase in the time interval of fire resistance preservation leads to a significant decrease in the value of the difference. In the temperature-time curve of an external fire, the difference increases with the increase of this time interval, but the effect of the time interval on the difference is not as significant as in the temperature-time curve of a hydrocarbon fire.

УДК 614.842.61

ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДНИХ ВОГНЕГАСНИХ РЕЧОВИН НА ОСНОВІ ПОЛІМЕРІВ ПОЛІАКРИЛАТУ

https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.1.(19).65-78

Стилик І. Г.[1]*, ORCID iD 0000-0002-8474-2014
Пономаренко Р. В.[1], ORCID iD 0000-0002-6300-3108
Кодрик А. І.[1], ORCID iD 0000-0002-3787-5674
Тітенко О. М.[1], ORCID iD 0000-0002-4950-8580
Борисов А. В.[2], ORCID iD 0000-0001-6858-0492
Добростан О. В.[1], ORCID iD 0000-0001-8908-0729
*E-mail: igor_stilik@ukr.net

[1]*Інститут наукових досліджень з цивільного захисту НУЦЗ України, Україна*
[2]*Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Україна*

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 24.04.2025
Пройшла рецензування: 05.05.2025

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

полімерні гідрогелі, в'язкість розчину, модифіковані системи, вогнегасні властивості, водні вогнегасні речовини, обмеження поширення пожеж, вогнезахист, метод розрахунку, вогнестійкість, математичне моделювання, ефективність гасіння, методика досліджень, пожежна безпека, вогнезахисна ефективність, екологічність, поширення вогню

АНОТАЦІЯ

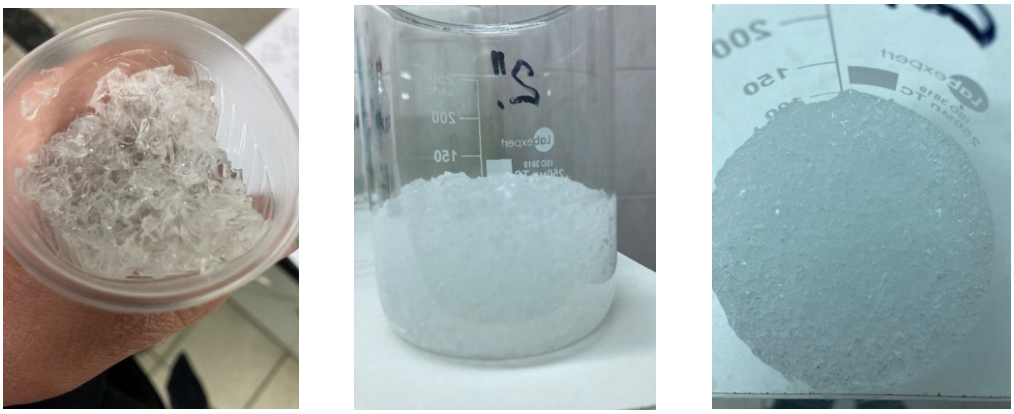
Завданнями даного дослідження є виявлення зміни властивостей водних вогнегасних розчинів та підвищення ефективності гасіння пожеж за рахунок використання модифікованих водних вогнегасних речовин з підвищеною вогнегасною здатністю, як підґрунтя покращення показників якості наявних, розроблення нових зразків водних вогнегасних речовин з використанням сучасних гелеутворюючих сполук, а також підвищення вогнегасної ефективності при їх застосуванні в елементах систем протипожежного захисту об'єктів та при пожежогасінні. Для вирішення цих завдань запропоновано попереднє створення рідких стабілізованих концентратів гелеутворюючих сполук для подальшого їх розчинення у воді, або з проміжним розчиненням у піноутворювачі. Визначено вплив різного роду добавок на їх фізико-механічні та експлуатаційні характеристики, що і є метою запропонованого дослідження. Проаналізовано сучасний стан щодо наявності та тенденцій розроблення у світовій та вітчизняній практиці вогнегасних речовин та технологій їх застосування. Окреслено можливі шляхи удосконалення рецептур та підвищення ефективності застосування вогнегасних речовин з урахуванням, насамперед, критеріїв їх впливу на фізико-хімічні властивості, економічності та екологічності. Зазначено, що в порівнянні з водою вогнегасні розчини на основі модифікованих систем та нових технологій їх продукування мають ряд переваг, що полягають в суттєвому збільшенні їх стійкості та покращенні адгезійних властивостей, що забезпечує підвищену вогнезахисну дію за рахунок утворення на поверхні горючої речовини пористого шару або плівки, що підвищує ефект охолодження, ускладнює розповсюдження полум'я по поверхні та захищає горючий матеріал за рахунок своєї низької теплопровідності та ізолюванню від доступу кисню з повітря, що важливо при гасінні поверхневих пожеж.
На підставі аналізу літературних джерел, а також власних теоретичних та експериментальних досліджень визначені шляхи удосконалення рецептур вогнегасних речовин, технологій їх застосування, а також розвитку відповідної нормативної, навчальної та довідкової баз

Постановка проблеми. Традиційно вогнегасні та вогнезахисні речовини на водній основі відіграють ключову роль у забезпеченні пожежної безпеки об'єктів. Крім великої кількості позитивних властивостей води, як вогнегасної речовини, вона має і ряд недоліків [1-3]. Одним з таких недоліків є низький коефіцієнт безпосереднього використання води при гасінні пожеж, що обумовлено стіканням з вертикальних і похилих поверхонь та явищем плівкового

кипіння на розжарені поверхні (ефектом Ляйденфроста). Для зменшення втрат води в процесі гасіння та обмеження поширення пожеж практикують введення до вогнегасного розчину загусників і змочувачів [4-8]. Добавки вносять свій специфічний внесок у зміну фізико-хімічних характеристик води, які можуть підвищити її вогнегасні та вогнезахисні властивості. Змочувачі та поверхнево-активні речовини знижують поверхневий натяг води, розділяють воду на більш дрібні краплі, збільшують змочуваність поверхні горючих матеріалів, забезпечують утворювання суцільного шару на поверхні горючого матеріалу з метою ізоляції його від кисню повітря. Загусники на основі водних розчинів термостійких полімерів впливають на в'язкість водного розчину, утворюють стабільні плівки на поверхні горючих речовин і матеріалів. Таким чином, існує нагальна потреба у комплексному дослідженні впливу таких добавок на робочі характеристики вогнегасних речовин для розроблення нових, більш ефективних складів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Для розкриття більшою мірою потенціалу води в якості вогнегасної речовини пропонується застосування відповідних добавок поверхнево-активних речовин, які утворюють у воді гідрогель і підвищують її адгезивні властивості [8-11]. За своєю природою гідрогелі є структурованими двофазними колоїдними вільно зв’язаними дисперсіями, що складаються з високомолекулярних компонентів ПАР (дисперсної фази), заповнених і оточених дисперсійним середовищем, в даному випадку водою. Ключовою особливістю таких стабілізованих композицій є, з одного боку, їх здатність перешкоджати доступу кисню повітря до зони горіння, за рахунок високої адгезії до поверхонь, що горять, а з іншого - більш швидка, ніж у води, здатність забезпечувати відведення тепла, що напряму впливає на зниження займистості матеріалів та підвищення вогнестійкості конструкцій об’єкта, відповідно.

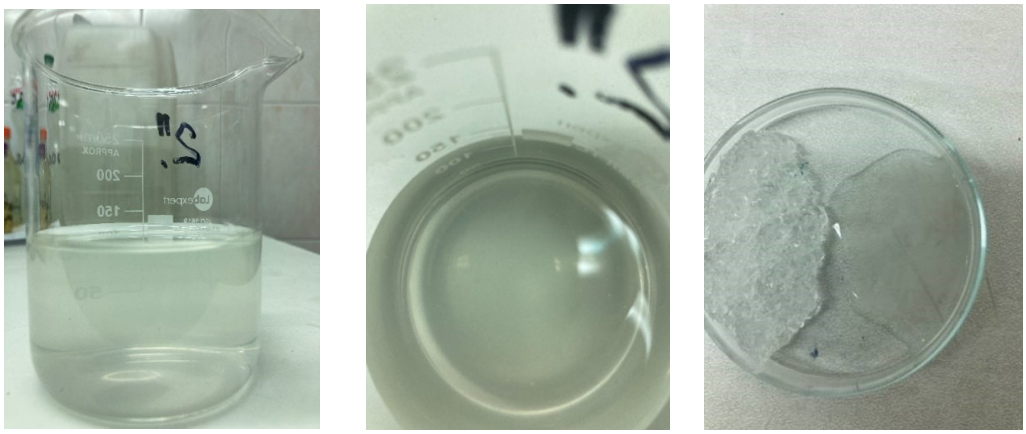
Недоліком таких гелів [12,13] та технологій їх отримання є можлива втрата теплоізоляційних властивостей після випаровування води, можливість грудкування при взаємодії з водою, необхідність ретельного змішування гелеутворюючого концентрату і води в розчині, що ускладнює, як розпилення гелю, так і обслуговування технічних засобів подачі після гасіння пожежі. Для вирішення цих проблем пропонується попереднє створення рідких стабілізованих концентратів гелеутворюючих сполук з подальшим їх розчинення у воді, або з проміжним розчиненням у піноутворювачі. Для цього потрібно визначити вплив різного роду добавок на їх фізико-механічні та експлуатаційні характеристики. В залежності від класу пожежі можливо як використання високо поглинаючих нерозчинних полімерів, наприклад Ecofloc A-07, так і водорозчинних полімерів з високою молекулярною масою, наприклад Ecofloc A-18, Ecofloc A-25. Полімери типу Ecofloc A-07 являють собою зшиті акрилові або акриламідні полімери, які можуть поглинати воду, маса якої багаторазово перевершує їхню власну масу, однак не розчиняючись у воді. Потім ці речовини присутні у формі частинок гелю, які сильно набрякають внаслідок гідратації та диспергують у воді для гасіння пожежі (рисунок 1). Якщо додати до набряклих частинок гелю надлишок води, остання залишиться у вигляді чистої водної фази обгортаючи гелеподібні частинки. Наявність таких частинок підвищує вогнегасну (вогнезахисну) ефективність протипожежного засобу оскільки при їх розпорошенні безпосередньо на вогонь (або на поверхню горючого матеріалу) на певному етапі вони налипають на поверхню, поступово випаровуються, зменшуючи ресурс часу та масу води, необхідних для гасіння пожежі. Застосування розчинів на основі такого гелеутворюючого матеріалу має бути ефективним для гасіння пожеж класу А.



a b c

Рисунок 1 – Загальний вигляд 2% водопоглинаючого нерозчинного полімеру Ecofloc A- 07 у воді

Добавки водорозчинних полімерів з високою молекулярною масою містять сополімери акрилової кислоти, зшиті за допомогою похідних поліефірів, які застосовують для надання тиксотропних властивостей воді (рисунок 2). Подібні тиксотропні суміші стоншуються під дією зсувних зусиль та/або швидкості руху [6-8] та легко розпорошуються за допомогою гідрантів. Як тільки ці зусилля зсуву усуваються, або швидкість стає близькою до нуля (при попаданні на поверхню), суміш потовщується, що дозволяє їй зачіплятися на поверхні і покривати її, гасити полум'я і запобігати поширенню вогню. При додаванні до них додаткової води має місце як зменшення концентрації полімеру у розчині, так і зниження в'язкості. Вірогідно застосування розчинів на основі такого гелеутворюючого матеріалу буде ефективним для гасіння вогнищ класу В.



a b c

Рисунок 2 – Загальний вигляд 1% концентрату водорозчинного полімеру з високою молекулярною масою типу Ecofloc A- 18 (a та b) та його порівняння з полімером типу Ecofloc A-07 (c)

Формулювання цілей дослідження. Метою роботи є дослідження впливу концентрації гелеутворюючих речовин та добавок до них на зміну фізико-механічних і експлуатаційних характеристик водо пінних розчинів водних вогнегасних речовин (ВВР) з метою збільшення ефективності їх застосування.

Методи досліджень. У роботі використано аналітичний та експериментальний методи досліджень, а також математичне моделювання та графічну інтерпретацію результатів досліджень.

Виклад основного матеріалу. Досліджувались гелеутворюючі порошкові склади (які являють собою порошок, що диспергується у воді), що складаються з матеріалу твердої дисперсної фази і стабілізатора, властивості яких при цьому забезпечують:

– дезагрегацію дисперсної фази, що перешкоджає її седиментації;

– тиксотропну зміну в'язкості водно-дисперсної композиції;

– регульовану зміну теплопровідності залежно від матеріалу твердої дисперсної фази та його вмісту у використовуваній композиції;

– тривалу стабільність дисперсної системи, у тому числі після часткового випаровування води, що забезпечує їй відновлюваність властивостей при повторному додаванні води;

– можливість швидкого формування вогнегасної речовини у надзвичайних ситуаціях.

В якості добавок застосовувалися:

- нерозчинний високо поглинаючий полімер Ecofloc A-07 (зшиті сополімери калієвої і амонійної солей акрилової кислоти), що поглинає воду, утворюючи гелеподібні частинки, сумісні з ПАР та мінеральними високодисперсними добавками, фракційністю 20…60 меш, з концентрацією у воді від 0,01 % до 0,5 % (далі гідрогель на основі акрилатів, або ПА);

- водорозчинний поліакриламід з високою молекулярною масою (М.М.= 2×105 – 6×106), серії Ecofloc A-18, Ecofloc A-25 (зшиті сополімери акрилової кислоти за допомогою похідних поліефірів, сополімери акриламіду та похідних акрилової кислоти, наприклад, акрилатної солі), сумісні з ПАР та мінеральними високодисперсними добавками, фракційності 20…60 меш, з концентрацією у воді від 0,01 % до 0,5 % (далі гідрогель на основі поліакриламідів, або ПАА);

- пінистий колоїдний діоксид кремнію, як суспендуючий агент для регулювання стабільності та текучості дисперсії;

- рафінована ріпакова олія - в якості рідкого середовища та емульгатору;

- сорбітанмоноолеат - в якості поверхнево-активної речовини з низьким ГЛБ для сприяння дисперсії сухих полімерних частинок у рослинній олії;

- натрієва сіль карбоксіметилцелюлози в якості загусника та для коригування в’язкості розчину.

В якості ПАР також використовували піноутворювачі як загального призначення, так і плівкоутворюючі, в концентрації від 0,1% до 6%. Для порівняння в якості «еталонів» використовували піноутворювачі з високою в’язкістю відомих виробників.

Здатність до прилипання гелевих вогнегасних речовин в залежності від концентрації гелеутворювача у розчині досліджували наступним чином. Щоб визначити адгезію гідрогелів до дерев’яних дощечок, останні розміром 100×50×8 (А×В×С) мм зважували перед тим, як дощечка буде занурена у гідрогель на глибину 50 мм протягом 60 с. Після того, як дощечку видаляли з гідрогелю, суспендували її протягом 600 с, та знову зважували. Масу гідрогелю, що залишався прилиплим до поверхні, розраховували з різниці в масі до і після занурювання. Потім визначали товщину утвореної плівки гідрогелю виходячи з його маси та площі поверхні зануреної до гелевого розчину. Отримані результати представлені у таблиці 1 ісвідчать про те, що величина відносної здатності до прилипання гідрогелю на основі полімерного гелеутворювача може досягати значних величин (від 7 до 8 разів у порівнянні з водою). Захисний шар гідрогелю містить велику кількість води, що може захистити поверхні від нагріву. Максимально ріст здатності до налипання знаходиться при концентрації гелеутворюючої речовини у розчині у межах 0,3%, що доцільно враховувати при створенні концентрату гелеутворювача.

Таблиця 1 – Адгезія гелеутворювача до дерев'яних дощечок в залежності від його концентрації.

Концентрація гелю у розчині, %	1,00	0,50	0,30	0,20	0,10	0,05
№ дощечки	4	3	6	9	7	8
Вага чистої дощечки, г	12,44	13,41	13,23	13,62	16,44	15,92
Вага дощечки після 600 с суспендування	13,35	14,09	13,76	14,01	16,70	16,15
Вага гелю на дощечки, г	2,24	0,69	0,53	0,39	0,26	0,23
Вага гелю мг/см^2	0,0224	0,0160	0,1260	0,0090	0,0054	0,0034
Товщина утвореної гелевої плівки, мм	0,021	0,015	0,012	0,0085	0,0049	0,0032

Залежність в'язкості водних вогнегасних речовин від вмісту гелеутворювача досліджувалась наступним чином. У випадку використання гідрогелю, отриманого з концентрату ВВР, виявлено значний діапазон величин в'язкості. В залежності від складу вогнегасної речовини та умов дослідження значення в'язкості гідрогелю можуть відрізнятися приблизно в 20000 разів від: 1 сП до 21,723 сП. Для вимірювання в'язкості були використані методики досліджень, які запропоновані у [2, 14].

Для вимірів у середині діапазону (динамічна в'язкість від 1,5 сП до 40 сП), або близьких до верхньої границі (динамічна в'язкість від 40 сП та вище) використовувався метод вимірювання та розрахунку уявної динамічної в'язкості (apparent dynamic viscosity) Стокса (падіння кульки в рідинному середовищі вздовж осі трубки) із застосуванням відповідних математичних моделей.

Вимірювання уявної динамічної в'язкості виконувалося шляхом відеозйомки та подальшої обробки відеофайлу з використанням комп'ютерної системи Movavi Video Suite 17.5.0, за допомогою якої обчислювались висота та час падіння кульки у випробуваному середовищі.

Досліджувалась залежність уявної в'язкості (apparent viscosity) гідрогелю від концентрації гелеутворювача та величини градієнта швидкості (velocity gradient), або швидкість відносної деформації зсуву (shear rate) в різних умовах руху гідрогелю. При змінах концентрації гелеутворювача від мінімальної 0 % до максимальної 1,819 % мали місце зміни фізичних властивостей рідин: від характерних для ньютонівських рідин до неньютонівських псевдопластичних (pseudoplastic liquids), для яких характерне зменшення уявної в'язкості (apparent viscosity) при зростанні напруження зсуву (shear stress) та тиксотропних (thixotropic liquids), для яких характерним є залежна від часу уявна в'язкість в умовах сталого градієнта швидкості.

Вимірювання значень у середині діапазону (динамічна в'язкість від 1,5 сП до 40 сП) відповідає часу падіння кульки у середовищі рідини, в'язкість якої ми вимірюємо, в діапазоні від 0,2 с до 0,7 с. У зв'язку з величинами в'язкості у вказаному діапазоні має місце прискорений рух кульки.

Для цього випадку (вимірів у середині діапазону) була розроблена математична модель руху з прискоренням кульки у рідинному середовищі. Сила супротиву руху кулі може бути виражена у вигляді загального рівняння Ньютона:

$$F_{fr}(t) = \xi(\mathrm{Re}(t)) \cdot S \cdot \frac{\rho_g \cdot \omega(t)^2}{2}, \text{ N}, \qquad (1)$$

де:t – поточний час руху кульки, с;

$\xi(Re(t))$ – коефіцієнт гідравлічного супротиву кулі, що рухається у середовищі гідрогелю, який визначається на основі критерію Рейнольдса;

S – площа поперекового перетину кулі, м^3;

ρ_g = 1100, густина гелю, кг/м^3;

$\omega(t)$ – швидкість руху кулі у середовищі гідрогелю, м/с

Рівняння, що описує динаміку руху кулі буде виглядати:

$$m \cdot \frac{d}{dt}(\omega(t)) = m \cdot (\rho_d - \rho_g) - F_{fr}(t) \text{,N,} \qquad (2)$$

де: m – маса кулі, кг;
$\rho d = 7800$, густина кулі, кг/м^3

Для розрахування коефіцієнту гідравлічного супротиву обтікання кулі обрана модель Glift та Gauvin, яка з точністю до 2% відповідає кривій Релея у діапазоні: 0,1 < Re <200000:

$$\xi(\mathrm{Re}(t)) = \frac{24}{\mathrm{Re}(t)} \cdot \left(1 + 0.15 \cdot \mathrm{Re}(t)^{0.686} + \frac{0.42}{1 + \frac{42500}{\mathrm{Re}(t)^{1.16}}} \right), \qquad (3)$$

При цьому, величина критерію Рейнольдса розраховується за традиційною формулою:

$$\mathrm{Re}(t) = \frac{\rho_g \cdot d \cdot \omega(t)}{\mu(\omega(t), t)}, \qquad (4)$$

де: d – діаметр кулі, м.

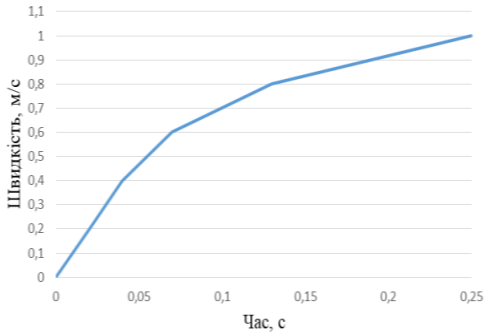
Тоді, використовуючи (2 та 3) отримаємо математичну модель руху кулі у середовищі гідрогелю для визначення взаємної залежності часу падіння кулі між довжиною падіння та в'язкістю у вигляді загальної системи рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}(\omega(t)) = (\rho_d - \rho_g) - \frac{24}{\mathrm{Re}(t)} \cdot \left(1 + 0.15 \cdot \mathrm{Re}(t)^{0.686} + \frac{0.42}{1 + \frac{42500}{\mathrm{Re}(t)^{1.16}}} \right) \cdot S \cdot \frac{\rho_g \cdot \omega(t)^2}{2} \\ \mathrm{Re}(t) = \frac{\rho_g \cdot d \cdot \omega(t)}{\mu(\omega(t), t)} \\ L = \int_{t_0}^{t_f} (\omega(t)) dt \end{cases}, \qquad (5)$$

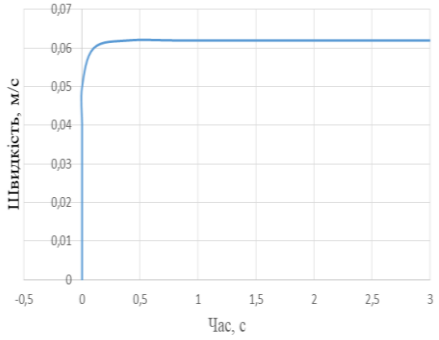
де: $L = 0{,}25$ – довжина падіння кулі, м;
t_0, t_f – час, відповідно, початку та кінця падіння кулі, с;
$\mu(\omega(t))$ – уявна динамічна в'язкість, Па×с

Вимірювання значень у діапазоні величин динамічної в'язкості близьких до верхньої границі (динамічна в'язкість від 40 сП і вище), що відповідає часу падіння кульки у середовищі рідини, в'язкість якої вимірюється, від 0,7 с і більше.

У зв'язку з величинами в'язкості у вказаному діапазоні має місце рух кульки практично з постійною швидкістю (рисунок 3 б).



а



б

Рисунок 3 – Залежність швидкості процесу падіння від часу падіння кульки в умовах проведення дослідів на існуючому обладнанні: а – при значеннях динамічної в'язкості у середньому діапазоні, б – при високих значеннях динамічної в'язкості, близьких до верхньої границі діапазону вимірювань

Для цього випадку (вимірів високих значеннях динамічної в'язкості, близьких до верхньої границі) була використана відома математична модель руху з постійною швидкістю кульки у рідинному середовищі – модель Стокса з уточненням Ладенбурга:

$$\mu = \frac{D_S^2 \cdot (\rho_F - \rho) \cdot g \cdot t_{fin}}{18 \cdot L \cdot \left(1 + 2.4 \cdot \frac{D_S}{D_{tube}}\right)}, \text{ m}^3, \qquad (6)$$

де: *ω(t)* – поточна швидкість кульки, м/с;

Ds - діаметр кульки, м;

Dtube – діаметр циліндру, м;

ρ, ρF – густина випробуваної рідини та сталі, кг/м3;

g = 9.81 м/с2 – прискорення вільного падіння;

μ – величина динамічної в'язкості випробуваної рідини, Па×с;

t – поточний час, с;

L – довжина падіння кульки, м

Результати експериментів з вимірювання уявної динамічної в'язкості робочого розчину від вмісту гелеутворювача Ecofloc-07 у водному середовищі та у межах концентрацій, що забезпечують максимальний діапазон динамічної в'язкості, представлені на рисунку 4.

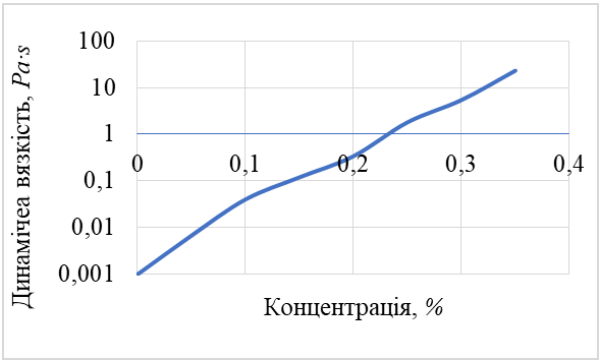


Рисунок 4 - Залежність уявної динамічної в'язкості від концентрації гелеутворювача

Результати експериментів з вимірювання уявної динамічної в'язкості робочого розчину від вмісту поліакриламіду з компонентами у межах, що можуть бути застосовані для створення рецептур водних вогнегасних речовин, представлені на рисунку 5.

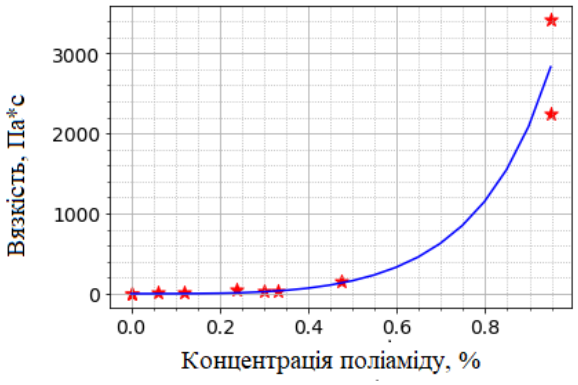


Рисунок 5 – Залежність динамічної в'язкості робочого розчину від вмісту поліакриламіду

Отримана апроксимаційна формула залежності в'язкості робочого розчину від вмісту поліакрилааміду з величиною достовірності апроксимації R^2 = 0,952 :

$$\mu = 0{,}482 \cdot \left(\exp\left[\left(\frac{p}{0.948} \right)^{3.706} \right] - 1 \right) \cdot 3412 + 1 \text{, с П,} \qquad (7)$$

де: μ - в'язкість робочого розчину, сП;

p – доля поліакрилату натрію, %

На Рисунку 6 представлена графічна залежність в'язкості розчину від концентрації ——високомомекулярного розчинного полімеру Ecofloc A-18 при додаванні до розчину натрієвої солі карбоксиметилцелюлози.

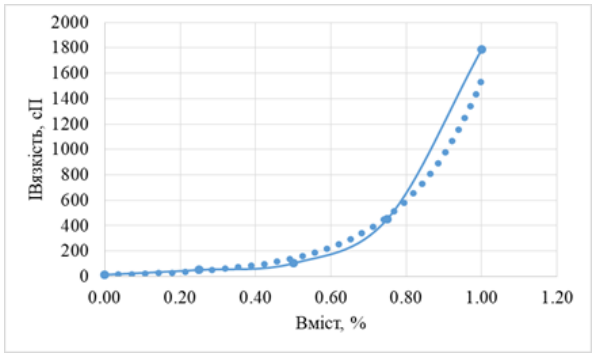


Рисунок 6 – Залежність динамічної в'язкості робочого розчину від вмісту КМЦ при вмісті поліакриламіду 0,1% та ПАВ 3%

Отримана апроксимаційна формула залежності в'язкості робочого розчину від вмісту поліакрилату натрію з величиною достовірності апроксимації R2 = 0,964:

$$\mu = 13{,}396 \cdot \exp(4{,}747 \cdot p)\text{, сП,} \quad (8)$$

де: μ - в'язкість робочого розчину, сП;
p – доля КМЦ, %

На рисунку 7 представлена графічна залежність в'язкості розчину від концентрації в робочого розчину поліакрилату натрію – нерозчиного водапоглинального полімеру Ecofloc A-07.

Отримана апроксимаційна формула залежності в'язкості робочого розчину від вмісту поліакрилату натрію з величиною достовірності апроксимації R2 = 0,964:

$$\mu = 1{,}75 \cdot \exp(10.394 \cdot p)\text{, сП,} \quad (9)$$

де: μ - в'язкість робочого розчину, сП;
p – доля поліакрилату натрію, %

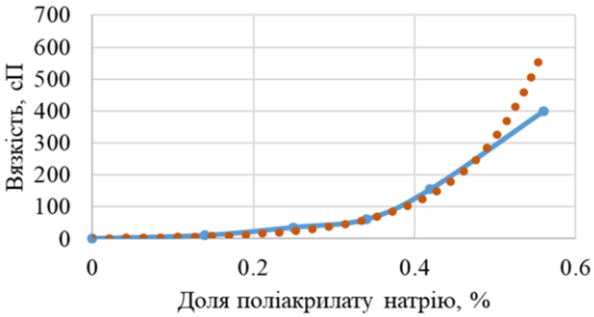
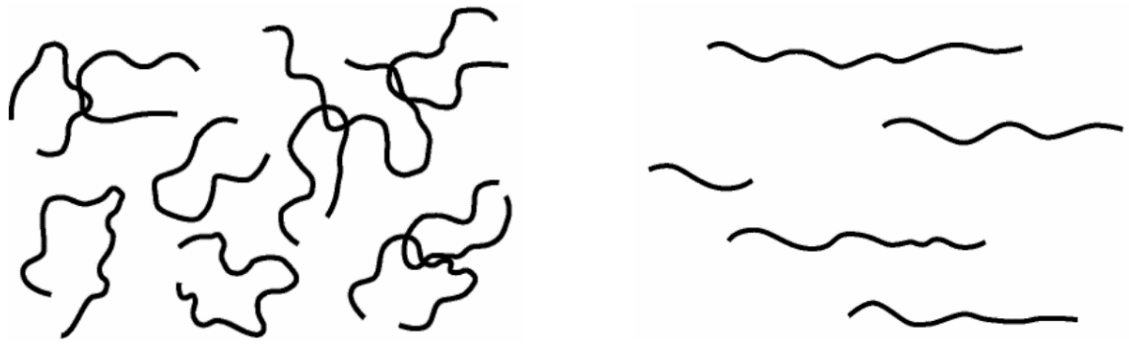


Рисунок 7 – Залежність динамічної в'язкості робочого розчину від вмісту поліакрилату натрію

В подальшому досліджувалась залежність в'язкості вогнегасних речовин від швидкості руху. Специфічність такої залежності для речовин, що досліджувались, можна пояснити тим, що основою гелеутворювача є поліакриламід, який має лінійно-ланцюгову структуру (linear-chain structure). Цим можна пояснити пониження уявної в'язкості при підвищенні значень відносного зсуву, адже при цьому має місце перехід від ізотропної (рисунок 8 а) до анізотропної структури (рисунок 8 б), що ускладнює вихрові потоки, характерні для турбулентного режиму. У той же час відомі тиксотропні властивості гідрогелів [7, 8], які можуть значно затримувати процес переходу від ізотропної до анізотропної структури.



а б

Рисунок. 8 – Зміни структури гідрогелю в залежності від швидкості потоку: а – рідина у нерухомому стані; б – рідина у стані руху

Встановлено факт різкого зниження в'язкості гідрогелю (близько до звичайної води) при збільшенні швидкостей подачі ВВР існуючими засобами пожежної техніки, що створює зручні умови для проектування спеціальної пожежної техніки з використанням гідрогелевих вогнегасних речовин.

На рисунку 9 представлена графічна залежність динамічної в'язкості від швидкості для ряду гелевих піноутворювачів відомих марок.

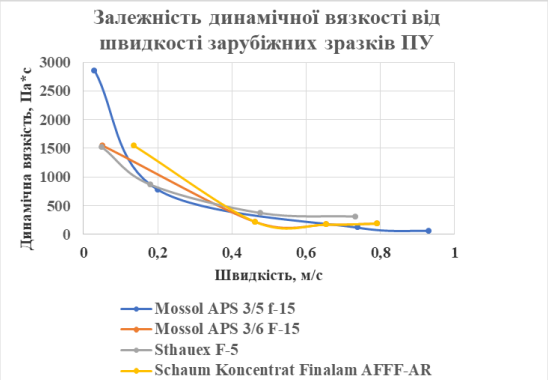


Рисунок 9 – Залежність динамічної в'язкості гелевих піноутворювачів від швидкості

На рисунку 10 наведена графічна залежність динамічної в'язкості ряду дослідних гелевих піноутворювачів на основі високомолекулярних гелеутворювачів типу Ecofloc A-18 та добавок до нього від швидкості.

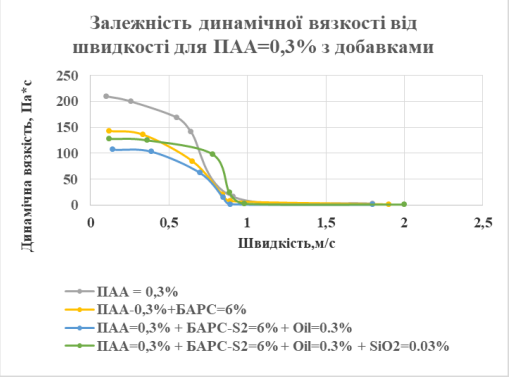


Рисунок 10 – Залежність динамічної в'язкості ряду дослідних гелевих піноутворювачів на основі високомолекулярних гелеутворювачів типу Ecofloc A-18 та добавок до нього від швидкості

В'язкість наведених відомих ПУ знаходилася у межах від 150 Па×с до 3000 Па×с. Вірогідно таку в'язкість розчину можливо отримати при додаванні до розчину піноутворювача гелеутворюючі сполуки. Частково це підтверджується і значним зменшенням в'язкості розчину при збільшенні швидкості (рисунки 9, 10), що характерно для розчинів з гелеутворюючими сполуками. Більш докладна інформація про наявність у цих ПУ гелеутворювача відсутня, оскільки інформація про склад концентратів є власністю фірм-виробників.

Однією з важливих характеристик розчинів, що досліджувалась, є їх в'язкість. Враховуючи, що на меті планувалось створення концентратів розчинів для гасіння вогнищ класу А та В, в тому числі на базі існуючих піноутворювачів, в якості контрольованих параметрів були кратність та стійкість піни, які є показниками її якості.

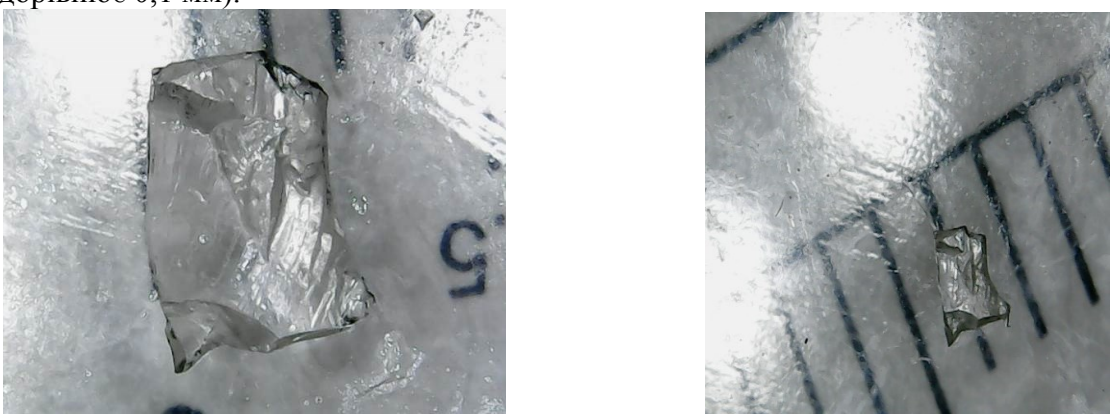
В подальшому вивчалися вплив на ВВР її концентрації, типу та кількості ПУ і вплив добавок: рапсової олії, колоїдного діоксиду кремнію (SiO_2), сорбітанмоноолеату (Span – 80) та натрієвої солі карбоксіметилцелюлози (КМЦ). Досліджувався їх вплив на в'язкість, кратність та стійкість утворюваного пінного або водного розчину.

При взаємодії часток гелеутворюючих сполук з водою важливо контролювати час набухання часток гелю, який залежить від розмірів часток та можливий процес їх агрегації. У таблиці 2 наведено орієнтовний час повного набухання (коли розмір частки перестає змінюватись) часток водо поглинаючого полімеру Ecofloc A-07 при зміні фракційності часток гелеутворювача.

Таблиця 2 – Залежність часу набухання часток гелеутворювача від його фракційності

Діапазон розмірів частки, мкм	>500	250-500	125-250	63-125	<63
Час повного набухання, с	270	165	135	30	10

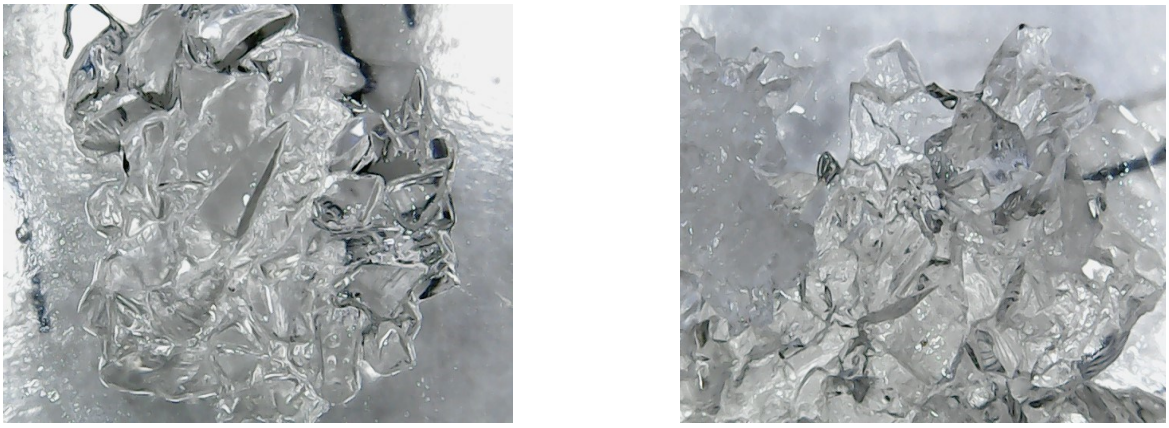
На рисунку 11а зображена частка гелеутворювача, а на 11б набухлий частка гелю. Частка гелю, що набухла у чистій воді за 50 секунд. Фракція більш ніж 0,125 мм (поділка на фото дорівнює 0,1 мм).



а б

Рисунок 11 – Частка гелю, що набухла у чистій воді за 50 секунд

На рисунку 12 наведені фото частки гелів ПАА та ПА, що зліпилися при контакті з водою.

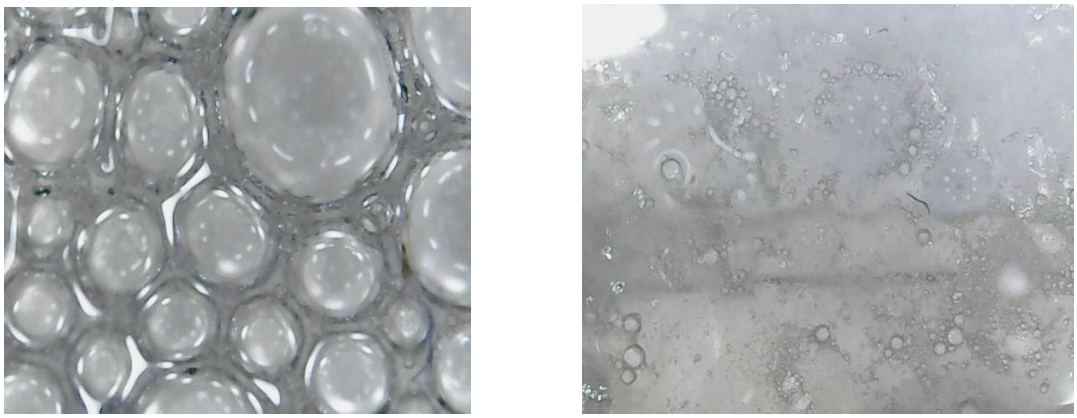


а б

Рисунок 12 – Частки гелю, що зліпилися при контакті з водою: а - високомолекулярний водорозчинний полімер; б – нерозчинний волого поглинальний полімер

Для вирішення питання щодо одночасного набухання часток прийнято рішення надалі використовувати частки однакової фракційності у діапазоні сит на розділювачі матеріалів. При використанні гелеутворювача без домішок при створенні гелевого розчина проводилося його додавання до води, що оберталася, малими дозами та однієї фракційності. Отриманий розчин перемішували у мішалці протягом 10 хвилин, потім відстоювали 30 хвилин. Подальше використання розчину проходило після контролю однорідності розчину. Якщо у розчині залишалися грудки, їх знову розбивали у мішалці.

При приготуванні комбінованих розчинів гелеутворювача, згідно з рекомендацій [7], використовували дисперсію полімеру в рапсовій рафінованій олії. Застосування олії (можливо з додаванням Span – 80 та діоксиду кремнію) надійно захищало частинки від агрегації (рисунок 13).



а б

Рисунок 13 - Загальний вигляд розчину у воді дисперсії полімерів у олії з додаванням діоксиду кремнію та Span – 80: а - високомолекулярний водорозчинний полімер; б - нерозчинний волого поглинальний полімер

На рисунках 14 та 15 наведені діаграми впливу добавок на експлуатаційні характеристики піни низької кратності, отриманої з розчинів високомолекулярного водорозчинного полімеру (ПАА) та нерозчинного вологопоглинального полімеру (ПА) у розчині 6 % ПУ загального призначення Барс 2S.

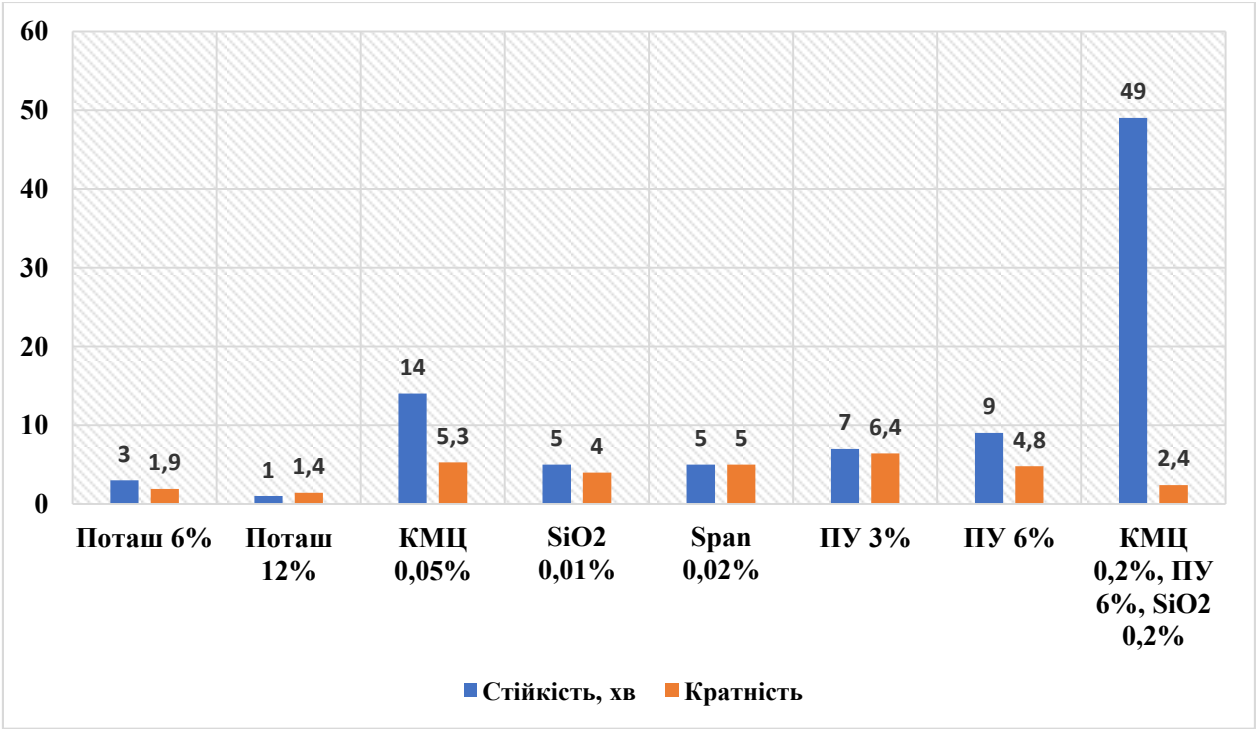


Рисунок 14 – Вплив добавок на стійкість і кратність піни утвореної у розчині 0,5% концентрату ECOFLOC A-07 та 6% ПУ загального призначення

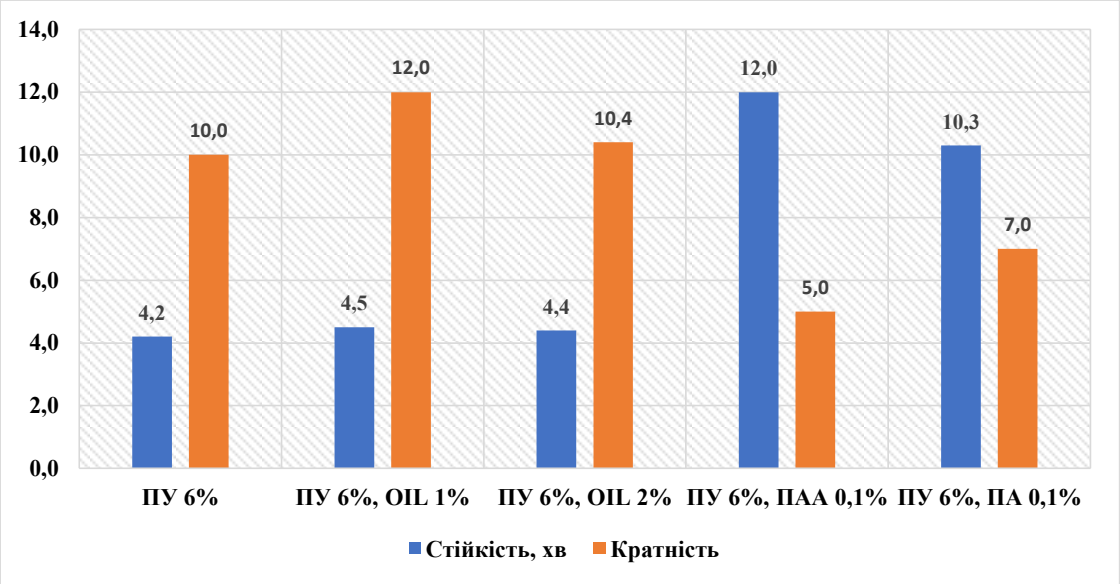


Рисунок 15 – Вплив добавок на стійкість і кратність піни отриманої з 0,5% концентрату вологопоглинаючого нерозчинного полімеру та 6% розчину ПУ загального призначення

Висновки та напрями подальших досліджень.

1. Основні напрямки подальших робіт стосовно створення концентратів ВВР, використовуючи в якості основи полімерні матеріали, мають включати застосування поперечно-зшитих полімерних частинок у формі дисперсії в рослинній олії. Додавання до дисперсії водо поглинаючої добавки до води необхідно в кількості, достатній для збільшення в'язкості отриманої суміші вода-добавка вище 100 сП, при цьому після поглинання води добавка має утримувати більше ніж 50 вагових відсотків (мас. %) від загальної кількості води. Дисперсія повинна легко змішуватися з водою, щоб отримати суміш з достатньо високою в'язкістю, яка б легко прилипала до вертикальних і горизонтальних поверхонь у функціональній товщині.

2. Полімер, що міститься в дисперсії, повинен мати короткий час набухання (для поглинання води) і легко виводиться за допомогою стандартного обладнання для пожежогасіння.

3. Дисперсію отримують шляхом диспергування подрібненого сухого полімеру, який набухає у воді, у рослинній олії, необов'язково з відповідними поверхнево-активними речовинами та стабілізуючими речовинами (якщо це необхідно або бажано).

4. Переважно, дисперсія являє собою сухий зшитий полімер щонайменше одного гідрофільного мономеру, диспергованого в рослинній олії. Як правило, полімер є сополімером акриламіду та похідних акрилової кислоти (наприклад, акрилатної солі). Добавка поєднує в собі властивості супер абсорбуючого полімеру, оскільки він може поглинати значну кількість води в порівнянні зі своїм розміром і вагою, і загусника, оскільки отримана суміш має відносно високу в'язкість. Полімерні частинки що використовуються, зазвичай повинні мати приблизно однакові розміри, для легшого контролю процесу набухання. Використовуватися можуть полімерні частинки розміром від приблизно 10 мікрон до приблизно 200 мікрон.

5. Додавання солей лужних металів негативно впливає на стійкість та кратність піни що утворюється. Застосування солей має сенс при використанні їх у водному розчину для гасіння пожежі, ефективність такого застосування підтверджено у [2].

6. Додавання до розчину суспендуючого агенту (діоксид

кремнію – SiO_2) та поверхнево-активної речовини з низьким ГЛБ (сорбітанмоноолеату – Span-80) практично не впливають на характеристики піни;

7. Натрієва сіль карбоксіметилцелюлози навіть у малих кількостях суттєво впливає на підвищення стійкості піни при одночасному зменшенні її кратності.

8. Концентрати для гасіння пожеж класу А доцільно створювати на водному розчині та розчині піноутворювача, концентрати ж для гасіння пожеж класу В - на розчині піноутворювача.

.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Тарахно О. В., Шаршанов А. Я. Фізико-хімічні основи використання води в пожежній справі : навчальний посібник. Харків, 2004. 252 с.
2. Звіт про науково-дослідну роботу (заключний) : Наукове обґрунтування підвищення ефективності гасіння пожеж за рахунок модифікації складів водних вогнегасних речовин та способів їх подавання / Кодрик А.І., Тітенко О.М., Борисов А.В., Мороз А.І. К. : ІДУ НД ЦЗ ДСНС України, 2021. 239 с. № ДР 0121U108447.
3. Fire protection agent and fire extinguishing agent for fires of solid materials / Freddy Kai Klaffmo, Bert Johnny Nilson, Britt Ann-Christine Langselius, pat. WO 2014 115038A2, C09D5 / 18, filed 22.01.2013, date of Patent 30.10.2014.
4. Kodrik A., Titenko, O., Zhartovskyi S., Borisov A. Theoretical Prerequisites for Creating a Fire-Extinguishing Solution Based on Water-Absorbing Polymer Ecoflocf-07 for Extinguishing Fires in Ecosystems. *Key Engineering Materials*. 2022. Vol. 927. P. 87–104.
5. Kodrik A.I., Shakhov S.M., Vinogradov S.A., Titenko O.M., Parkhomchyk O.V. Mathematical modeling of gas-liquid flow in compressed air foam generation systems. *Technology audit and production reserves*. 2020. № 4/3(54), P. 29–35.
6. A fire retardant and a method for production thereof flammschutzmittel und dessen herstellung agent ignifuge et procede de fabrication / Nilsson Jens Birger, Glenelg North, pat. EP 1546 286 B1, C09K 21/04 (2006.01) C09K 21/06 (2006.01), A62D 1/00 (2006.01) A62D 1/06 (2006.01), filed 7.08.2002, date of Patent 29.06.2005.
7. 界面活性剤系組成物 (Surfactant Composition) / 大庭啓彦 (OHBA, Yoshihiko), 岩本真司 (IWAMOTO, Shinji), 光宗将太 (MITSUMUNE, Shota), 小林正隆 (KOBAYASHI, Masataka), 鶴仁 (TSURU, Hitoshi), 波多江修一 (HATAE, Shuuichi), 上江洲一也 (UEZU, Kazuya), 山家桂一 (YAMAGA, Keiichi), 永友義夫 (NAGATOMO, Yoshio), 梅木久夫 (UMEKI, Hisao), pat. WO 2006/028233 A1, filed 05.09.2005, date of Patent 16.03.2005.
8. Sortwell Methods of preventing and/or extinguishing fires / Edwin T., pat. US 7,189,337 B2 US20050045849A1, date of Patent 13.03.2007.
9. Кодрик А.І., Виноградов С.А., Тітенко О.М., Шахов С.М. Вплив кратності компресійної піні на дисперсність і стійкість. *Проблеми пожежної безпеки*, 2019. Вип. 45. С. 27–43.
10. High-stability foams for long-term suppression of hydrocarbon vapors / Sophany Thach, Kenneth C. Miller, Karen S. Schultz, pat. US 5296164, МПК A62D 1/02 (20060101); A62D 1/00 (20060101); A62D 3/00 (20060101); B01J 013/00; B01J 019/16, filed 2.07.1992, date of Patent 22.03.1994.
11. Foam concentrate / Louis R. DiMaio, Peter J. Chiesa, Jr., pat.US 5225095, A01N 25/16 (20060101); A62D 1/02 (20060101); A62D 1/00 (20060101); A62D 3/00 (20060101); B01J 013/00, filed 2.08.1991, date of Patent 6.07.1993.
12. Fire mitigation and moderating agents / Edmund R. J. Pennartz, pat. US 8080186 США, МПК A62D 1/00 (20060101); C09K 21/04 (20060101); C09K 21/08 (20060101); C09K 21/06 (20060101), filed 16.11.2010, date of Patent 20.12.2011.
13. Flame retardant and fire extinguishing product for fires in solid materals / Brytt Ann-Krystyn Lanhselyus, Freddy Kai Klaffmo, pat. US 9 586 070 SShA, MPK A62D 1/00 (20060101); C09D 5/18 (20060101); C09K 21/12 (20060101); C09K 21/10 (20060101); C08L 27/12 (20060101); C09K 21/04 (20060101), filed 22.06.2015, date of Patent 7.03.2017.
14. Stylyk I., Kodrik A., Titenko O., Zhartovskyi S. The possibilities of using a fire extinguishing substance based on water-soluble polymer for extinguishing solid combustible materials. *Defect and Diffusion Forum*. Vol. 438. 2025. Pp.123–130.

REFERENCES

1.Tarakhno O. V., Sharshanov A. Ya. (2004). Fizyko-khimichni osnovy vykorystannia vody v pozhezhnii spravi [Physico-chemical basics of water use in firefighting]. Kharkiv [in Ukrainian].
2.Kodryk A.I., Titenko O.M., Borysov A.V., Moroz A.I. (2021). Zvit pro naukovo-doslidnu robotu (zakliuchnyi): Naukove obgruntuvannia pidvyshchennia efektyvnosti hasinnia pozhezh za rakhunok modyfikatsii skladiv vodnykh vohnehasnykh rechovyn ta sposobiv yikh podavannia [Research report (final): Scientific justification for increasing the efficiency of fire extinguishing by modifying the compositions of aqueous fire extinguishing agents and methods of their application] K: IDU ND TsZ DSNS Ukrainy, № DR 0121U108447 [in Ukrainian].
3.Fire protection agent and fire extinguishing agent for fires of solid materials / Freddy Kai Klaffmo, Bert Johnny Nilson, Britt Ann-Christine Langselius, pat. WO 2014 115038A2, C09D5 / 18, filed 22.01.2013, date of Patent 30.10.2014 [in English].
4.Kodrik A., Titenko, O., Zhartovskyi S., Borisov A. (2022). Theoretical Prerequisites for Creating a Fire-Extinguishing Solution Based on Water-Absorbing Polymer Ecoflocf-07 for Extinguishing Fires in Ecosystems. Key Engineering Materials, 927, 87–104 [in English].

5.Kodrik A.I., Shakhov S.M., Vinogradov S.A., Titenko O.M., Parkhomchyk O.V. (2020). Mathematical modeling of gas-liquid flow in compressed air foam generation systems. Technology audit and production reserves, 4/3(54), 29–35 [in English].
6.A fire retardant and a method for production thereof flammschutzmittel und dessen herstellung agent ignifuge et procede de fabrication / Nilsson Jens Birger, Glenelg North, pat. EP 1546 286 B1, C09K 21/04 (2006.01) C09K 21/06 (2006.01), A62D 1/00 (2006.01) A62D 1/06 (2006.01), filed 7.08.2002, date of Patent 29.06.2005 [in English].
7.界面活性剤系組成物 (Surfactant Composition) / 大庭啓彦 (OHBA, Yoshihiko), 岩本真司 (IWAMOTO, Shinji), 光宗将太 (MITSUMUNE, Shota), 小林正隆 (KOBAYASHI, Masataka), 鶴仁 (TSURU, Hitoshi), 波多江修一 (HATAE, Shuuichi), 上江洲一也 (UEZU, Kazuya), 山家桂一 (YAMAGA, Keiichi), 永友義夫 (NAGATOMO, Yoshio), 梅木久夫 (UMEKI, Hisao), pat. WO 2006/028233 A1, filed 05.09.2005, date of Patent 16.03.2005 [in English].
8.Sortwell Methods of preventing and/or extinguishing fires / Edwin T., pat. US 7,189,337 B2 US20050045849A1, date of Patent 13.03.2007 [in English].
9. Kodryk A.I., Vynohradov S.A., Titenko O.M., Shakhov S.M. (2019). Vplyv kratnosti kompresiinoi pini na dyspersnist i stiikist [The effect of compression foam multiplicity on dispersion and stability]. *Problemy pozhezhnoi bezpeky,* 45, 27–43 [in Ukrainian].
10. High-stability foams for long-term suppression of hydrocarbon vapors / Sophany Thach, Kenneth C. Miller, Karen S. Schultz, pat. US 5296164, МПК A62D 1/02 (20060101); A62D 1/00 (20060101); A62D 3/00 (20060101); B01J 013/00; B01J 019/16, filed 2.07.1992, date of Patent 22.03.1994 [in English].
11. Foam concentrate / Louis R. DiMaio, Peter J. Chiesa, Jr., pat.US 5225095, A01N 25/16 (20060101); A62D 1/02 (20060101); A62D 1/00 (20060101); A62D 3/00 (20060101); B01J 013/00, filed 2.08.1991, date of Patent 6.07.1993 [in English].
12. Fire mitigation and moderating agents / Edmund R. J. Pennartz, pat. US 8080186 США, МПК A62D 1/00 (20060101); C09K 21/04 (20060101); C09K 21/08 (20060101); C09K 21/06 (20060101), filed 16.11.2010, date of Patent 20.12.2011 [in English].
13. Flame retardant and fire extinguishing product for fires in solid materals / Brytt Ann-Krystyn Lanhselyus, Freddy Kai Klaffmo, pat. US 9 586 070 SShA, MPK A62D 1/00 (20060101); C09D 5/18 (20060101); C09K 21/12 (20060101); C09K 21/10 (20060101); C08L 27/12 (20060101); C09K 21/04 (20060101), filed 22.06.2015, date of Patent 7.03.2017 [in English].
14. Stylyk I., Kodrik A., Titenko O., Zhartovskyi S. (2025). The possibilities of using a fire extinguishing substance based on water-soluble polymer for extinguishing solid combustible materials. Defect and Diffusion Forum, 438, 123–130 [in English].

INVESTIGATION OF THE PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF WATER-BASED FIRE EXTINGUISHING AGENTS BASED ON POLYACRYLATE POLYMERS

I. Stylyk[1], R. Ponomarenko[1], A. Kodryk[1], A. Borysov[2], O. Titenko[1], O. Dobrostan[1]

[1]Institute of Scientific Research on Civil Protection of the National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine
[2]Institute of Public Administration and Research in Civil Protection, Ukraine

KEYWORDS:

polymer hydrogels, solution viscosity, modified systems, fire extinguishing efficiency, water-based agents, fire spread limitation, fire protection, formulation design, fire resistance, mathematical modeling, suppression effectiveness, experimental methodology, fire safety, fire-retardant performance, environmental compatibility, flame propagation.

ABSTRACT

This study aims to investigate changes in the properties of water-based fire extinguishing solutions and to enhance fire suppression efficiency through the application of modified agents with improved fire-extinguishing performance. The research serves as a basis for improving the quality indicators of existing solutions and for developing new formulations using advanced gel-forming compounds. These agents are intended for use in fire protection systems and in active firefighting applications to increase overall extinguishing effectiveness. The proposed approach involves the preliminary formulation of stabilized liquid concentrates containing gel-forming compounds, which are subsequently diluted in water or, optionally, in foam-forming agents. The study focuses on assessing the impact of various additives on the physicochemical, mechanical, and operational properties of the resulting fire extinguishing solutions. A comprehensive analysis of the current state and development trends in fire extinguishing agents and their application technologies, both internationally and domestically, is presented. Potential directions for formulation optimization and improvements in extinguishing efficiency are identified, with special emphasis on the influence of component selection on physicochemical properties, cost-efficiency, and environmental safety. Compared to water, modified fire extinguishing solutions offer several advantages, including increased stability, enhanced adhesion to combustible surfaces, and the formation of a porous or film-like protective layer. These features contribute to improved cooling, inhibition of flame propagation, and thermal insulation, thereby limiting oxygen access and increasing the overall fire resistance of treated materials. Such properties are particularly critical for the suppression of surface fires. Based on literature review and the authors' theoretical and experimental findings, this work outlines strategies for improving fire extinguishing formulations, application technologies, and the development of corresponding regulatory, educational, and reference frameworks.

УДК 614.842.612

СУЧАСНИЙ СТАН ВИКОРИСТАННЯ У ПОЖЕЖОГАСІННІ ТА СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВОДНИХ ВОГНЕГАСНИХ РОЗЧИНІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ЗМОЧУВАЧІВ

https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.1.(19).79-88

Пархоменко В-П. О., ORCID iD 0000-0001-7431-4801
Михалічко Б.М., ORCID iD 0000-0002-5583-9992
Пархоменко Р. В., ORCID iD 0009-0008-2954-6767
E-mail: pvpo2018@gmail.com

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 28.03.2025
Пройшла рецензування: 28.04.2025

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

змочувач, поверхнево-активна речовина, водні вогнегасні речовини, гасіння пожеж, класи пожеж

АНОТАЦІЯ

Гасіння пожеж є ключовим завданням оперативно-рятувальної служби цивільного захисту, спрямованим на запобігання поширенню вогню, мінімізацію збитків і порятунок життів. Вода та водні розчини залишаються найпоширенішими вогнегасними засобами, а їхні властивості можна суттєво покращити шляхом додавання хімічних речовин, зокрема змочувачів, які підвищують змочувальну здатність, зменшують випаровування та посилюють тепловідведення. Незважаючи на прогрес у розробці водних вогнегасних розчинів (ВВР), пошук нових складів залишається актуальним через появу матеріалів із високими температурами займання та специфіку різних класів пожеж. Метою статті є аналіз сучасного стану використання ВВР зі змочувачами та способів підвищення їхньої ефективності. У роботі використано аналітичний метод із обробкою даних про ефективність таких засобів. Дослідження показують, що вода завдяки високій теплоємності (4,19·10³ Дж/кг·К) і теплоті пароутворення (2260 Дж/кг) забезпечує охолодження, але має низьку змочувальну здатність через високий поверхневий натяг. Додавання поверхнево-активних речовин (ПАР) аніонних, неіоногенних, амфотерних чи цвіттер-іонних у концентраціях 0,1-5% знижує натяг до 15-25 мН/м, скорочуючи час гасіння на 20-50% і витрату води до 1/3. Аналіз публікацій і патентів свідчить про ефективність солей d-металів ($CuCl_2$), які інгібують полум'я, та ПАР для гасіння пожеж класів А, В, пожеж в екосистемах і літій-іонних елементів живлення. Розробки включають гелеутворювальні засоби (Ecofloc A-07), низькофлуорні AFFF (гасіння гептану за 30-40 с) і склади з антикорозійними добавками. Висновки підкреслюють потенціал ВВР у підвищенні безпеки та екологічності, а перспективи розвитку пов'язані з оптимізацією складів і адаптацією до складних умов.

Постановка проблеми. Гасіння пожеж є однією з найважливіших завдань оперативно-рятувальної служби цивільного захисту (ОРС ЦЗ), оскільки своєчасна та ефективна ліквідація займання дозволяє запобігти поширенню вогню в інші приміщення та будівлі, зменшити матеріальні збитки і врятувати життя людей. На даний час існує безліч вогнегасних речовин, основними з яких є вода, водний розчин піноутворювача та вогнегасний порошок. Найбільш поширене використання мають вода та водні розчини піноутворювачів та солей. Завдяки введенню до складу води певних хімічних речовин можна суттєво підвищити вогнегасні властивості води, зокрема покращити змочувальну здатність, зменшити випаровування та підвищити ефективність тепловідведення.

Незважаючи на значний прогрес у створенні водних вогнегасних розчинів, питання пошуку нових водних вогнегасних речовин (ВВР) залишається актуальним. Це зумовлено, насамперед, появою нових речовин та матеріалів, які характеризуються підвищеними температурами займання та самозаймання за умов дії на них полум'ям, а також характеристикам різних класів пожеж.

Таким чином, необхідність пошуку нових ВВР та підвищення їх ефективності є актуальною науковою та практичною проблемою. Розробка нових ВВР дозволить збільшити ефективність придушення полум'я, знизити витрати на ліквідацію пожеж та мінімізувати екологічні ризики, пов'язані з використанням вогнегасних засобів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Удосконаленням вогнегасних властивостей води було присвячена не одна наукова праця. Так у роботах [1, 2] висвітлено високу вогнегасну ефективність солей перехідних металів, які, крім спроможності гальмувати утворення активних радикалів безпосередньо в полум'ї, здатні також хімічно зв'язуватись з донорними гетероатомами (N, O, S) органічних речовин, внаслідок чого ряд параметрів пожежонебезпеки таких вуглеводнів суттєво знижуються, що у підсумку і забезпечує високу вогнегасну здатність водних розчинів солей *d*-металів.

Також їх беззаперечна ефективність як вогнегасної речовини для створення загороджувальних смуг під час пожеж в екосистемах представлено в роботі [3], де застосовано водний розчин полімеру, який отримано за допомогою диспергування подрібненого сухого полімеру, що набухає у воді, рослинній олії, з додаванням поверхнево-активних та стабілізувальних речовин. Досліджено можливість використання вологого утримуваного полімеру Ecofloc A-07 як розчину водорозчинних прозорих гранул, які підвищують його адгезію та здатні до плівкоутворення; на цій основі були розроблені гелеутворювальні вогнезахисні речовини. Внаслідок проведених досліджень встановлено, що запропонована речовина для створення загороджувальних смуг ефективна протягом 30 годин.

Використання ВВР, які здатні зменшувати гідравлічний опір (з ефектом Томса) за допомогою похідних гуанідину [4] засвідчило, що додавання навіть в незначних концентраціях (0,03-0,290 %) полігексаметиленгуанідину гідрохлориду, який відноситься до IV класу токсичності та є ефективним інгібітором біокорозії, збільшує витрату водного вогнегасника в 1,20-1,78 рази при використанні пожежного ствола, та у системах пожежогасіння, де встановлено збільшення витрати розчину полімеру з дренчерних форсунок на 1,86-7,69 % в діапазоні концентрацій (0,3-1,4 %) вздовж досліджуваного трубопроводу (1 м і 13 м). Використовуваний полімер має властивості «біологічно м'якої» поверхнево-активної речовини і відповідає високим екологічним вимогам охорони навколишнього середовища та раціонального використання природних ресурсів.

Методи дослідження. Аналітичний метод досліджень, що супроводжується обробкою інформації, стосовно ефективності використання в пожежогасінні водних вогнегасних розчинів зі змочувачами.

Формулювання цілей дослідження. Метою дослідження є висвітлення сучасного стану використання у пожежогасінні водних вогнегасних розчинів зі змочувачами та способи підвищення їх ефективності.

Виклад основного матеріалу. Вода – це найпоширеніший і доволі ефективний вогнегасний засіб. Вона має високу теплоємність – $4{,}19 \cdot 10^3$ Дж/кг·К. Під час гасіння пожежі вода, а точніше, певна її кількість випаровується внаслідок контактування з високотемпературним осередком пожежі. З 1 л води утворюється близько 1700 л водяної пари. При цьому відбувається розбавлення реагуючих речовин. Внаслідок великих значень теплоти пароутворення (близько 2260 Дж/кг) вода забирає із зони горіння велику кількість тепла, що, у свою чергу, забезпечує помітний охолоджувальний ефект.

Вода має високу термічну стійкість. Розкладання води на водень та кисень відбувається при температурах понад 1700 °С. Тому гасіння водою горючих матеріалів та рідин у більшості випадків є

безпечним, адже температура горіння більшості речовин не перевищує 1300 °С.

Найбільший вогнегасний ефект спостерігається при застосуванні води у вигляді аерозолю. Водним аерозолем можна гасити навіть горючі рідини, оскільки туманоподібна хмара дрібнорозприсканої води має ізолюючий ефект. Застосування ж в аерозольному пожежогасінні водних розчинів змочувачів, які зменшують поверхневий натяг води, дає можливість зменшити її витрати на гасіння деяких матеріалів на 30-50%.

Істотним недоліком води є її порівняно низька змочувальна здатність і велика текучість, які зумовлені високим значенням коефіцієнта поверхневого натягу при відносно малій в'язкості. Ці властивості води зумовлюють той факт, що поверхня зіткнення крапель води з палаючою поверхнею є невеликою, і при гасінні вода з них швидко стікає.

Для поліпшення вогнегасних властивостей води необхідно зменшити її поверхневий натяг і підвищити змочувальну здатність. У цьому випадку при зіткненні з матеріалом, що горить, вона буде розтікатися по його поверхні, покривати велику площу, легше проникати в пори матеріалу й охолоджувати його, і, отже, можна швидше досягти ефекту гасіння. Для зменшення поверхневого натягу води при гасінні пожеж горючих речовин, що погано змочуються водою, застосовуються водні розчини змочувачів. Завдяки цьому краплі води втрачають кулеподібну форму, легко розтікаються та проникають у капіляри й пори твердих горючих матеріалів, витісняючи з них повітря.

В якості змочувачів до води часто додають ***поверхнево-активні речовини (ПАР),*** які спроможні знижувати поверхневий натяг води. Причому значення коефіцієнта поверхневого натягу води залежить від концентрації ПАР у воді.

Молекули ПАР мають асиметричну будову і є біфункціональними. Тобто молекула ПАР з одного кінця має гідрофільну головку, яка відповідає за розчинність ПАР у воді, а з протилежного кінця молекули присутній гідрофобний хвіст, який не змочується водою і тому хвіст молекули ПАР орієнтується в протилежний від води бік. Властивості ПАР залежать від хімічної природи та будови молекул. ПАР умовно можна розділити на дві великі групи.

До першої групи відносяться речовини, які розчинні у воді, але не дисоціюють і не утворюють іонів, – ***неіоногенні ПАР***. До неіоногенних ПАР можна віднести поліоксисполуки, прості поліефіри, поліаміни. Розчинення таких сполук у воді зумовлено утворенням між атомами оксигену цих сполук і молекулами води водневого зв'язку й утворенням гідратів. Вуглеводнева частина, що входить у сполуку, зумовлює її гідрофобні властивості.

У другу групу входять речовини, молекули яких при розчинені у воді дисоціюють на іони. Такі ПАР називають ***іоногенними*** [5].

Залежно від знаку заряду іоногенні ПАР діляться на:

- ***катіоноактивні***, при дисоціації яких утворюються позитивно заряджені органічні катіони і протиіони – як правило, невеликі неорганічні аніони, що забезпечує розчинність молекул ПАР у воді (солі високомолекулярних органічних нітрогенвмісних сполук);
- ***аніоноактивні***, при дисоціації яких утворюються негативно заряджені органічні аніони і катіони металів, що теж зумовлює розчинність ПАР у воді (мила, органічні сульфати і сульфонати, відомі як "миючі засоби"). Також до них відносять відносяться карбонові кислоти і солі синтетичних жирних кислот (стеарат натрію, олеат натрію), алкілсульфати, алкіларилсульфонати, лауретсульфат, сульфосукцинат і інші типи поверхнево-активних аніонів (фосфати, тіосульфати). Алкілсульфати і алкіларилсульфонати є сильними кислотами і можуть бути використані в кислих і сольових розчинах

(на відміну від солей жирних кислот вони мають низьку вогнегасну ефективність в кислих середовищах);

• ***неіоногенні*** ПАР –це сполуки, які при розчиненні у воді не іонізуються. Розчинність таких речовин у воді зумовлена наявністю в них гідрофільних функціональних груп. Неіоногенні ПАР – похідні поліоксіетиленів: $RO(C_2H_4O)_nH$ – полігіліколевий етержирних спиртів; $RCOO(C_2H_4O)_nH$ – полігліколевий етер жирних кислот; $RCONH(C_2H_4O)_nH$ – полігіліколевий етер амідів жирних кислот тощо. Поліоксіетиленові етери алкілфенолів – найбільш поширена група неіногенних ПАР (ОП-4, ОП-7, ОП-10). Частіше вони бувають рідкими або утворюють пасту. За об'ємом виробництва й споживання, неіоногенні поверхнево-активні речовини стоять на другому місці після аніонактивних ПАР. Вони добре стабілізують піну, знімають статичну напругу на волокнах синтетичних тканин, поліпшують стан хутра.

• ***амфотерні*** ПАР мають дві функціональні групи. Залежно від pH середовища володіють аніонактивними або катіонактивними властивостями. У лужному середовищі проявляють аніонактивні властивості, в кислому середовищі – катіонактивні. До амфотерних ПАР відносяться бетаїн, аміноксиди і такі ПАР як імідазоліни (кокоамфодіацетат натрію). Амфотерні ПАР мають більш м'який вплив на шкіру, ніж іонні ПАР. Але амфотерні ПАР погано піняться, а це викладає у споживачів відчуття, що продукція неякісна. Проте молекули амфотерних ПАР змінюють свій заряд відповідно до властивостей середовища, в якій вони перебувають, тому вони забезпечують максимальне очищення, не мають негативного впливу на захисний бар'єр шкіри. Ще один недолік амфотерних ПАР: вони дуже важко згущуються. З цією метою виробникам мийних засобів доводиться додавати до них аніонні та неіонні ПАР. В результаті амфотерні ПАР стають густими і добре піняться;

• ***цвітеріонні*** ПАР містять у молекулах дві протилежно заряджені групи. Позитивний заряд майже завжди забезпечується амонієвою групою, а негативно заряджені групи можуть бути різні; найчастіше негативний заряд забезпечують карбоксилат-іони. Такі ПАР нерідко відносять до амфотерних, але ці терміни не ідентичні. Заряди амфотерного ПАР змінюються в залежності від pH середовища, при цьому при переході від кислого до лужного середовища тип ПАР змінюється від катіонного через цвітеріонний до аніонного. Ні кислотні, ні основні групи не несуть постійного заряду і цвітеріоном таке ПАР стає тільки в певному інтервалі pH. Цвіттер-іонні ПАР мають гарні дерматологічні властивості, не подразнюють слизову оболонку очей, тому часто використовуються у складі косметичних засобів [6].

Ефективність використання ПАР у цілях пожежогасіння, як ефективних добавок до води, підтверджено великою кількість патентної документації та науковими працями.

Так, результати наукової роботи [7] показали, що мономерні добавки ПАР до води забезпечують оптимальні об'єми поглинутої води деревиною, причому цвіттер-іонні ПАР демонструють найефективніше змочування деревини, тоді як катіонні ПАР мають найменший змочувальний вплив. Причому маса адсорбованої води в цій композиційній системі залежала від типу і пропорційного співвідношення добавок. Схема з більшим співвідношенням цвіттер-іонних та аніонних ПАР продемонструвала помітні переваги у підвищенні змочуваності целюлози. Таким чином, було запропоновано рецептуру ВВР, спроможної гасити лісові пожежі, що включає в себе (Capstone1157) + (SDBS) у співвідношенні 3:2 для покращення змочуваності.

У патенті [8] описано ефективність змочувача, призначеного для підвищення ефективності гасіння пожеж, зокрема шляхом покращення проникнення води в горючі матеріали та зниження поверхневого натягу. Змочувач розроблений для використання у водних розчинах, які застосовуються для боротьби з пожежами класів A, B та інших. У ньому зазначається, що запропонована композиція забезпечує зменшення часу гасіння, завдяки кращому розподілу води на поверхні горючих матеріалів, покращену здатність проникати в пористі або щільні структури, що сприяє ефективному охолодженню зони горіння та екологічну безпеку, оскільки в складі ВВР мінімізується використання шкідливих фторовмісних сполук (таких як перфтороктансульфонова кислота (PFOS)), які часто присутні в традиційних змочувачах.

Ефективність вогнегасіння підтверджується описаними випробуваннями, де згадана у [8] композиція продемонструвала кращі результати порівняно зі звичайною водою чи стандартними змочувачами, хоча конкретні кількісні дані (наприклад, відсоткове зменшення часу гасіння) у відкритій частині патенту не деталізуються.

Запропонований у патенті [8] змочувач демонструє потенціал для підвищення ефективності гасіння пожеж завдяки оптимізованому складу, який покращує проникнення та охолоджуючу дію води. Основними активними компонентами є ПАР (5-20%) у поєднанні з розчинниками (2-10%) та стабілізаторами (0,5-5%), розведеними у воді (60-90%). Ця композиція позиціонується як екологічно безпечніша альтернатива традиційним засобам, що робить її перспективною для подальших досліджень у моїй науковій роботі.

Автори роботи запропонували дієвий водний вогнегасний засіб [9], що демонструє потенціал для підвищення ефективності гасіння завдяки введенню добавок, які покращують властивості води. Цей засіб може знижувати поверхневий натяг води, сприяючи її кращому проникненню в горючі матеріали, а також посилювати охолоджувальний ефект завдяки оптимальному теплопоглинанню. Ефективність проявляється у скороченні часу гасіння та підвищенні здатності засобу працювати з пористими або щільними матеріалами, такими як деревина чи текстиль (пожежі класу A), а також, з горючими рідинами (клас B).

Запропонований водний вогнегасний засіб є ефективним рішенням для гасіння пожеж завдяки поєднанню фізичних (охолодження) та хімічних (інгібування полум’я) механізмів дії. Його склад включає воду (70-90%), ПАР (1-5%), фосфати чи карбонати (2-10%), гліколь або спирт (1-5%) та антикорозійні добавки (0,1-2%), що забезпечує баланс між вогнегасною здатністю та безпекою для особового складу при його використанні. Цей вогнегасний засіб є цікавим прикладом комбінованого підходу до підвищення ефективності води як вогнегасної речовини, особливо в контексті екологічних вимог та універсальності застосування.

В роботі [10] розроблена ВВР може використовуватись для придушення полум’я при горінні вуглеводнів. В її основі 40% водний розчин купрум(II) хлориду, що є досить ефективним вогнегасним засобом. В умовах експерименту тривалість гасіння осередку пожежі класу B аерозолем ВВР (40% водний розчин $CuCl_2$ + 1% ПУ) становить 0,6 с, що в 26 разів ефективніше аналогічного гасіння водним аерозолем. Найменша витрата ВВР, необхідна для повного придушення вуглеводневого полум'я, становила 0,034 л·м$^{-2}$ (мінімальна витрата води 0,883 л·м$^{-2}$); $I_{ВВР}$ = 0,057 л·м$^{-2}$·с$^{-1}$ (I_{H_2O} = 0,100 л·м$^{-2}$·с$^{-1}$).

Аналіз інформації, отриманої при вивченні вогнегасних властивостей $CuCl_2$-вмісних ВВР, дозволив виявити особливості поведінки водних розчинів купрум(II) хлориду у разі придушення вуглеводневого полум’ї. Це дало змогу адекватно інтерпретувати механізм

придушення полум'я концентрованими водними розчинами солей купруму(II).

Дієвий вогнегасний засіб представлений у патенті [11] характеризується тим, що його готують шляхом додавання водорозчинних поверхнево-активних речовин до води у масовому співвідношенні (0,2-1,0):100, де масова частка ПАР у водному розчині становить 1%-35%. Також цей вогнегасний засіб може впливати на вогнегасну ефективність, перебуваючи в різних аґрегатних станах – твердому, рідкому і газоподібному одночасно; під час нагрівання свій вогнегасний ефект проявляє за рахунок дефлаграції, водночас виділяє азот та інші інертні гази для створення дефлаграційної задухи; в порівнянні зі звичайною водою вогнегасна речовина є ефективнішою на 50%. Крім того, після закачування її у вогнегасник проявляє високий вогнегасний ефект при її подачі дрібнодисперсним струменем завдяки насадкам-розпилювачам; вона ефективно зменшує поверхневий натяг води, причому практичного ефекту досягає за рахунок гасіння на великій відстані, не менше 10 м, де витрата вогнегасного засобу на вогнегасіння становить лише 1/3 від аналогічної витрати звичайної води (без добавок). Собівартість цього вогнегасного засобу не є великою, що в свою чергу є перевагою для економічного ефекту при використанні пожежно-рятувальними підрозділами, а також має значний вплив на безпеку особового складу при гасінні пожеж в складних умовах.

Нові змочувальні композиції, описані в статті [12], демонструють значний потенціал для підвищення ефективності гасіння лісових пожеж. Результати експериментальних досліджень показали, що ці вогнегасні засоби здатні суттєво зменшувати час гасіння порівняно з водою без додавання додаткових компонентів, завдяки покращеному змочуванню та проникненню в матеріал. У статті наведено результати польових випробувань, де композиція з добавками знижувала інтенсивність горіння швидше, ніж звичайна вода: наприклад, у тесті з травою час гасіння скоротився на 20-30%, а для гілок – на 15-25%. Це пов'язано зі зниженням поверхневого натягу води, що дозволяє їй краще покривати та просочувати сухі рослинні настили, а також із затримкою вологи на поверхні, що перешкоджає повторному займанню. Такі властивості роблять вогнегасну речовину особливо цінною для боротьби з лісовими пожежами, де швидке проникнення в густі рослинні хащі є ключовим фактором. Їхній склад забезпечує оптимальні фізичні властивості для боротьби з пожежами в екосистемах. Склад даного вогнегасного засобу включає воду (95-99%), ПАР (0,1-2%), згущувачі (0,5-1%) та стабілізатори (0,1-1%).

Одним з багатьох напрямків використання водних вогнегасних засобів із додаванням ПАР є гасіння літій-іонних елементів живлення (ЛІЕЖ). Вогнегасні засоби для ЛІЕЖ, описані в статті [13] на основі патентного аналізу, демонструють значний потенціал під час гасіння таких пожеж завдяки застосуванню ПАР. В роботі зазначається, що додавання ПАР до рідких, твердих чи комбінованих вогнегасних засобів підвищує їхню здатність проникати в осередок горіння та охолоджувати батарею. Зокрема, патенти вказують на скорочення часу гасіння на 20-40% порівняно з традиційними засобами (наприклад, вода без додаткових інгрідієнтів чи CO_2), а також на зменшення ймовірності повторного займання завдяки кращому змочуванню та ізоляції. Це пов'язано з низьким поверхневим натягом розчинів із ПАР (15-25 мН/м), що дозволяє ефективніше покривати поверхню батареї та поглинати тепло. Такі засоби особливо ефективні для гасіння пожеж ЛІЕЖ у закритих системах, наприклад, у сховищах енергії, де термічне розкладання може призвести до вибуху. Крім того, автори підкреслюють здатність деяких ВВР на основі ПАР абсорбувати горючі та токсичні гази (H_2, CO), що виділяються під час термічного розпадання, що є додатковою перевагою.

Вогнегасні засоби для ЛІЕЖ, проаналізовані в статті [13], є важливим кроком до підвищення безпеки їх використання. Їхній склад включає воду (70-95%), неіоногенні ПАР (0,5-5%), аніонні ПАР (0,5-3%), вогнегасні добавки (2-10%) і стабілізатори (1-5%), забезпечують швидке вогнегасіння, охолодження та зниження токсичних викидів. Цей аналіз є цінним прикладом того, як патентні технології з використанням ПАР можуть вирішувати проблеми термічного розгону ЛІЕЖ, що відкриває перспективи для подальших досліджень у цій сфері.

В рамках проведення аналізу ефективності ВВР зі змочувачами автори звернули увагу на патент [14], який описує водний вогнегасний засіб, призначений для ефективного гасіння пожеж із високою екологічною безпекою та низькою корозійною стійкістю. Цей засіб розроблений для боротьби з пожежами різних класів і має на меті подолання недоліків традиційних вогнегасних засобів, таких як токсичність і складність утилізації. Водний вогнегасний засіб, демонструє високу ефективність завдяки комбінації охолоджуючих, ізоляційних і інгібувальних властивостей. У тексті патенту зазначається, що засіб здатний швидко гасити полум'я шляхом зниження температури горіння та створення захисного шару, який перешкоджає доступу кисню. Результати експериментальних досліджень показують, що його ефективно використовують для гасіння пожеж класів A, B і електричного обладнання, а також зменшує ризик повторного займання. Основою його ефективності є використання ПАР, які знижують поверхневий натяг, дозволяючи засобу краще проникати в осередок горіння, і наявність солей, які інгібують полум'я. Засіб також відзначається низькою токсичністю та корозійною здатністю, що робить його безпечним для використання в житлових приміщеннях чи транспортних засобах.

Технологія приготування передбачає розчинення солей і ПАР у воді при температурі 30-50°C, додавання стабілізаторів і антикорозійних добавок із подальшим перемішуванням до однорідної маси. У патенті також зазначається можливість регулювання вмісту компонентів залежно від цільового застосування.

Склад вогнегасного засобу включає воду (85-95%), ПАР (0,5-3%), солі (2-8%), стабілізатори (1-4%) та антикорозійні добавки (0,1-1%) що забезпечує швидке охолодження, ізоляцію та хімічне придушення полум'я з мінімальним впливом на довкілля. Цей вогнегасний засіб є цікавим зі сторони сучасного підходу до розробки водних вогнегасних засобів із покращеними характеристиками, що може бути використано для порівняння з іншими технологіями в цій галузі.

Також варто відмітити вогнегасний засіб описаний в патенті [15], який спеціально розроблений для боротьби із самозайманням вугілля. Цей засіб вирізняється високою теплоабсорбційною здатністю та екологічною безпекою, що робить його перспективним рішенням для запобігання та гасіння пожеж у вугільних шахтах. Водний вогнегасний засіб, представлений у цьому патенті, є високоефективним завдяки своїй здатності швидко поглинати тепло та ізолювати вугілля від кисню, що є ключовими факторами для запобігання самозайманню. Зазначається, що засіб може значно знизити температуру вугілля (до 50-70°C нижче за контрольні зразки не оброблені засобом) та уповільнити процеси окислення, які призводять до термічного розкладання. Вважається, що висока теплоабсорбційна властивість досягається завдяки комбінації компонентів, які при контакті з тепловим полем утворюють гелеподібний шар, що блокує доступ кисню та вбирає значну кількість енергії. Експериментальні дані свідчать, що засіб скорочує час гасіння невеликих осередків займання на 30-50% порівняно з традиційними водними розчинами, а також зменшує виділення CO та інших горючих газів. Ця ефективність робить його особливо цінним для профілактики та

боротьби з підземними пожежами на вугільних шахтах, де контроль температури та окислення є критично важливим.

Процес приготування включає розчинення солей і ПАР у воді при температурі 40-60°C, додавання гелеутворювачів і стабілізаторів із подальшим перемішуванням до однорідного стану. Його склад, що включає воду (80-90%), теплопоглинаючі солі (5-10%), ПАР (0,5-2%), гелеутворювачі (1-3%) та стабілізатори (1-3%), забезпечує швидке охолодження, ізоляцію та перешкоджає окисненню. Підкреслюється, що склад може бути адаптований залежно від типу вугілля та умов застосування. Цей засіб є цікавим прикладом інноваційного підходу до розробки екологічно безпечних вогнегасних засобів, адаптованих до специфічних умов вугільних пожеж, що може слугувати основою для порівняння з іншими технологіями в цій галузі.

Також перспективною є розроблена AFFF-композиція зі зниженим вмістом флуору, що демонструє вражаючу ефективність гасіння пожеж, зокрема класу B. Результати експериментальних досліджень, наведені в статті [16], показують, що цей засіб здатен гасити полум'я гептану за 30-40 секунд за стандартних умов горіння, що лише на 5-10% повільніше, ніж традиційні флуоровмісні AFFF. Це досягається завдяки ретельному підбору ПАР, які знижують поверхневий натяг води до 17–19 мН/м і забезпечують швидке утворення плівки на поверхні горючої рідини. Екологічна перевага полягає в зниженні вмісту пер- і поліфлуоралкільних речовин (PFAS), що робить засіб менш шкідливим для довкілля порівняно з комерційними аналогами, зберігаючи при цьому конкурентну вогнегасну здатність.

Розроблена AFFF-композиція зі зниженим вмістом флуору є ефективним і екологічним рішенням для гасіння пожеж класу B. Її склад забезпечує швидке утворення плівки та стійку піну при мінімальному впливі на довкілля і включає воду (90-95%), флуорвуглецеві ПАР (0,1-0,5%), вуглеводневі ПАР (1-3%), піноутворювачі (1-2%) та стабілізатори (0,5-1,5%).

Ще одна перспективна ВВР, представлена у патенті [17], демонструє високу ефективність вогнегасіння завдяки поєднанню охолоджувальної та інгібувальної дії. У патенті зазначається, що засіб здатен швидко знижувати температуру осередку горіння та переривати реакцію горіння, що дозволяє гасити полум'я швидше, ніж вода без домішок. Використання даного універсального вогнегасного засобу зі складом, що включає воду (80-95%), ПАР (0,5-5%), солі (2-10%), стабілізатори (1-5%) та антикорозійні добавки (0,1-2%) є ефективним для пожеж класів A, B і навіть F. Додавання поверхнево-активних речовин і спеціальних солей сприяє кращому проникненню ВВР в горючі матеріали та утворенню ізоляційного шару, що зменшує доступ кисню.

Висновки і напрями подальших досліджень. Проведений аналіз сучасного стану використання водних вогнегасних розчинів із змочувачами свідчить про їхню високу актуальність і потенціал у підвищенні ефективності гасіння пожеж. Вода є найбільш поширеним вогнегасним засобом та залишається основою для розробки нових ВВР. Однак її недоліки, такі як високий поверхневий натяг і низька змочувальна здатність, успішно долаються шляхом додавання до води добавок, які суттєво покращують проникнення в горючі матеріали, зменшують витрати води та підвищують охолоджуючий ефект. Дослідження показали, що додавання ПАР (аніонних, неіоногенних, амфотерних чи цвіттер-іонних) у концентраціях від 0,1 до 5% здатне скоротити час гасіння пожеж від 20 до 50% залежно від класу пожежі а також знизити витрату води до третини порівняно з водою без застосування додаткових інгрідієнтів.

Ефективність вогнегасіння водними розчинами ПАР підтверджується як науковими працями, так і патентною

документацією. Їх практичне значення полягає у скороченні матеріальних збитків, підвищенні безпеки особового складу ОРС ЦЗ та зменшенні екологічних ризиків. Зокрема, засоби з низькою токсичністю чи антикорозійними добавками дозволяють застосовувати їх у екологічно чутливих середовищах, таких як житлові приміщення чи транспорт. Експериментальні дані також підкреслюють здатність ПАР абсорбувати токсичні гази, що є додатковою перевагою при гасінні літій-іонних батарей чи інших джерел термічного розгону.

Представлений у статті широкий спектр ВВР із додаванням ПАР знаходять застосування для гасіння пожеж класів А, Б та електроустановок і ЛІЕЖ. Перспектива подальшого розвитку заданого напрямку досліджень вбачається в аспекті пошуку нових та оптимізації вже відомих ВВР. Проведення досліджень саме в такому ключі дасть змогу забезпечити особовий склад пожежно-рятувальних підрозділів широким спектром ефективних водних вогнегасних засобів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Карвацька М. Я., Пастухов П. В., Петровський В. Л., Лавренюк О. І., Михалічко Б. М. Вогнегасні випробування концентрованого водного розчину ферум(III) сульфату. *Пожежна безпека: зб. наук. праць*, 2022. №40. С. 55-60. URL: https://doi.org/10.32447/20786662.40.2022.06
2. Карвацька М. Я., Лавренюк О. І., Михалічко Б. М. Сучасний стан і напрями вдосконалення водних вогнегасних речовин. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*, 2023. № 1 (15) С. 92-100. URL: https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1(15).92-100
3. Стилик І. Г., Кодрик А.І., Борисов А.В., Тітенко О.М., Куценко М. А. Щодо можливості використання розчинів на основі сополімерів акриламіду для створення загороджувальних смуг під час пожеж в екосистемах. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*, 2024. № 2 (18) С. 75-81. URL: https://doi.org/10.33269/nvcz.2024.2(18).75-81
4. Maglyovana T., Nyzhnyk T., Stas S., Kolesnikov D., Strikalenko T. Improving the efficiency of water fire extinguishing systems operation by using guanidine polymers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020. 1/10 (103). P. 20-25. URL: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.196881
5. Тарахно О.В. Теоретичні основи пожежовибухонебезпеки. Харків: АЦЗУ, 2006. – 395 с.
6. Стрельцова О. О., Менчук В. В. Утворення, властивості розчинів і застосування поверхневоактивних речовин: навчально-методичний посібник / О. О. Стрельцова, В. В. Менчук – Одеса: Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, 2021. – 132 с.
7. Junqing Meng, Zihan Zhou, Chunhui Lyu, Yi-Xiang Lyu, Yimin Liang, Baisheng Nie Unveiling Optimal Wetting Additives for Extinguishing Wood Fires: Insights from Molecular Simulation and Experimental Investigations. Surfaces and Interfaces. Volume 44, January 2024, 103805. URL: https://doi.org/10.1016/j.surfin.2023.103805
8. Jin Su Lyeon Wetting agent composition for extinguishing fires. European patent office WO 2020/166900. Germany, 2021.
9. Chang Shanqiang, Zhu Gaoqiang, Chang Jian, Jin Changwei Water-based extinguishing agent and preparation method thereof. Patent CN109260644B. China, 2020.
10. Mykhalichko B., Lavrenyuk H., Mykhalichko O. New water-based fire extinguishant: Elaboration, bench-scale tests, and flame extinguishment efficiency determination by cupric chloride aqueous solutions. Fire Safety Journal, 2019. 105. 188-195. URL: https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.03.005
11. Xiao-Gang Jiang, Li Ying, Yuan Zhijiang, Zhi-Lin Zheng, Yuting Zhai High-efficiency fire extinguishing agent. Patent CN108421201A. China, 2018.
12. Joanna Rakowska, Ryszard Szczygieł, Mirosław Kwiatkowski, Bożenna Porycka, Katarzyna Radwan, Krystyna Prochaska Application Tests of New Wetting Compositions for Wildland Firefighting. Fire Technology (Springer US), 2017. Vol. 53. Iss: 3. P. 1379-1398. URL: https://doi.org/10.1007/s10694-016-0640-0
13. Jianqi Zhang, Tao Fan, Shuai Yuan, Chongye Chang, Kuo Wang, Ziwei Song, Xinming Qian Patent-based technological developments and surfactants application of lithium-ion batteries fire-extinguishing agent. Journal of Energy Chemistry, 2024. Vol. 88. P. 39-63. URL: https://doi.org/10.1016/j.jechem.2023.08.037
14. Yang Yang, Tang Zhi Water-based fire extinguishing agent. Patent CN111617428A. China, 2020.
15. Yu Minggao, Yang Hongyu, Zheng Kai Water-based high-efficiency fire extinguishing agent with high heat absorption property for coal spontaneous combustion. Patent CN110339519A. China, 2019.
16. Wu, WH., Wang, JL., Zhou, YQ. et al. Formulation and performance of aqueous film-forming foam fire extinguishing agent composed of a short-chain perfluorinated heterocyclic surfactant as the key component. Chemical Papers, 2023. Vol. 77. P. 6763-6771. URL: https://doi.org/10.1007/s11696-023-02975-1
17. Dongnan Chen Fire-extinguishing aqueous solution, preparation method thereof and fire-extinguishing balls. Patent CN110732110A. China, 2020.

REFERENCES

1. Karvatska M. Ya., Pastukhov P. V. & Mykhalichko B. M. (2022). Vohnehasni vyprobuvannia kontsentrovanoho vodnoho rozchynu ferum(III) sulfatu. *Pozhezhna bezpeka: zb. nauk. prats, 40*, 55-60. doi: https://doi.org/10.32447/20786662.40.2022.06

2. Karvatska M. Ya., Lavreniuk O. I., Mykhalichko B. M. (2023). Suchasnyi stan i napriamy vdoskonalennia vodnykh vohnehasnykh rechovyn. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka, 1* (15), 92-100. doi:https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1(15).92-100
3. Stylyk I. H., Kodryk A.I. & Kutsenko M. A. (2024). Shchodo mozhlyvosti vykorystannia rozchyniv na osnovi sopolimeriv akrylamidu dlia stvorennia zahorodzhuvalnykh smuh pid chas pozhezh v ekosystemakh. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka, 2* (18), 75-81. doi: https://doi.org/10.33269/nvcz.2024.2(18).75-81
4. Maglyovana T., Nyzhnyk T., Stas S., Kolesnikov D., Strikalenko T. (2020). Improving the efficiency of water fire extinguishing systems operation by using guanidine polymers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, *1/10* (103), 20-25. doi: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.196881
5. Tarakhno O. V. (2006). *Teoretychni osnovy pozhezhovybukhonebezpeky*. Kharkiv: ATsZU.
6. Streltsova O. O., Menchuk V. V. (2021). *Utvorennia, vlastyvosti rozchyniv i zastosuvannia poverkhnevoaktyvnykh rechovyn: navchalno-metodychnyi posibnyk*. Odesa: Odeskyi natsionalnyi universytet imeni I. I. Mechnykova.
7. Junqing Meng, Zihan Zhou & Baisheng Nie (2024). Unveiling Optimal Wetting Additives for Extinguishing Wood Fires: Insights from Molecular Simulation and Experimental Investigations. *Surfaces and Interfaces, 44*, 103805. doi: https://doi.org/10.1016/j.surfin.2023.103805
8. Jin Su Lyeon (2021). *Wetting agent composition for extinguishing fires*. (Patent Germany WO 2020/166900). European patent office.
9. Chang Shanqiang, Zhu Gaoqiang, Chang Jian, Jin Changwei (2020). *Water-based extinguishing agent and preparation method thereof*. (Patent China CN109260644B).
10. Mykhalichko B., Lavrenyuk H., Mykhalichko O. (2019). *New water-based fire extinguishant: Elaboration, bench-scale tests, and flame extinguishment efficiency determination by cupric chloride aqueous solutions. Fire Safety Journal, 105*, 188-195. doi: https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.03.005
11. Xiao-Gang Jiang, Li Ying & Yuting Zhai (2018). *High-efficiency fire extinguishing agent*. (Patent China CN108421201A).
12. Joanna Rakowska, Ryszard Szczygieł & Krystyna Prochaska (2017). *Application Tests of New Wetting Compositions for Wildland Firefighting. Fire Technology (Springer US), 53*, 3, 1379-1398. doi: https://doi.org/10.1007/s10694-016-0640-0
13. Jianqi Zhang, Tao Fan & Xinming Qian (2024). *Patent-based technological developments and surfactants application of lithium-ion batteries fire-extinguishing agent. Journal of Energy Chemistry, 88*, 39-63. doi: https://doi.org/10.1016/j.jechem.2023.08.037
14. Yang Yang, Tang Zhi (2020). *Water-based fire extinguishing agent*. (Patent China CN111617428A).
15. Yu Minggao, Yang Hongyu, Zheng Kai (2019). *Water-based high-efficiency fire extinguishing agent with high heat absorption property for coal spontaneous combustion.* (Patent China CN110339519A).
16. Wen-Hai Wu, Ji-Li Wang & Aidong Zhang (2023). *Formulation and performance of aqueous film-forming foam fire extinguishing agent composed of a short-chain perfluorinated heterocyclic surfactant as the key component. Chemical Papers, 77*, 6763-6771. doi: https://doi.org/10.1007/s11696-023-02975-1
17. Dongnan Chen (2020). *Fire-extinguishing aqueous solution, preparation method thereof and fire-extinguishing balls*. (Patent China CN110732110A).

CURRENT STATE OF USE IN FIRE FIREFIGHTING AND WAYS TO INCREASE THE EFFICIENCY OF AQUEOUS FIRE EXTINGUISHING SOLUTIONS USING WETTING AGENTS

V.-P. Parkhomenko, B. Mykhalichko, R. Parkhomenko

Lviv State University of Life Safety, Ukraine

KEYWORDS:

wetting agent, surfactant, aqueous extinguishing agents, fire extinguishing, fire classes.

ABSTRACT

Firefighting is a key task of the civil protection service aimed at preventing the spread of fire, minimising damage and saving lives. Water and aqueous solutions remain the most common extinguishing agents, and their properties can be significantly improved by adding chemicals, such as wetting agents, which increase wetting capacity, reduce evaporation and enhance heat dissipation. Despite the progress in the development of aqueous fire extinguishing agents (AFAs), the search for new compositions remains relevant due to the emergence of materials with high ignition temperatures and the specifics of different classes of fires. The aim of the article is to analyse the current state of use of water-based fire extinguishing agents with wetting agents and ways to improve their efficiency. The paper uses an analytical method with data processing on the effectiveness of such agents. Studies have shown that water, due to its high heat capacity (4.19-10³ J/kg-K) and heat of vapour (2260 J/kg), provides cooling, but has a low wetting capacity due to its high surface tension. The addition of surfactants (anionic, nonionic, amphoteric or zwitterionic) in concentrations of 0.1-5% reduces the tension to 15-25 mN/m, reducing the extinguishing time by 20-50% and water consumption by up to 1/3. An analysis of publications and patents shows the effectiveness of d-metal salts ($CuCl_2$), which inhibit flames, and surfactants for extinguishing Class A and B fires, fires in ecosystems, and lithium-ion batteries. The developments include gel-forming agents (Ecofloc A-07), low-fluorine AFFFs (extinguishing heptane in 30-40 seconds) and formulations with anti-corrosion additives. The findings highlight the potential of VWRs to improve safety and environmental performance, and the prospects for development are related to optimising formulations and adapting to challenging conditions.

УДК 614.841.3

НОРМАТИВНО-ПРАВОВЕ РЕГУЛЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ТА МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПОЖЕЖНИХ ПОЯСІВ ЯК ІНСТРУМЕНТ ПІДВИЩЕННЯ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ В УКРАЇНІ

https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.1.(19).89-96

Кравченко Ю. П., ORCID iD 0000-0002-3709-7016
Михайлов В. М., ORCID iD 0000-0002-5629-1500
Павлов С. С., ORCID iD 0000-0002-9927-898X
*E-mail: kravchenko-yulia@ukr.net

Інститут наукових досліджень з цивільного захисту НУЦЗ України, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 30.04.2025
Пройшла рецензування: 12.05.2025

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

пожежна безпека, пожежні пояси, механізми державного регулювання, цивільний захист

АНОТАЦІЯ

В статті проаналізовано чинні нормативно-правові акти в Україні та європейські стандарти, якими визначається поняття «пожежні пояси» і вимоги до їх показників якості та методів випробовування. Встановлено, що до основних методів випробовування поясу належать: визначення зовнішнього вигляду, розмірів та маси; видовження під час дії випробовувальної статистичної навантаги; стійкості щодо дії статичної навантаги та дії динамічної навантаги; максимального зусилля в момент динамічного ривка; стійкості щодо дій граничних температур експлуатування, температури 200 °С та теплового випромінювання; стійкості матеріалу поясового паска щодо дії відкритого полум'я; стійкості щодо дії води та поверхнево-активних речовин; стійкості фала до дії температури 600 °С, до дії теплового випромінювання, після дії відкритого полум'я, дії гарячого предмета; жорсткості фала; показників надійності; перевіряння відповідності матеріалів та купованих виробів. Результати дослідження засвідчили, що уніфікована номенклатура показників якості поясів, що використовуються в різних галузях економіки, встановлена на основі аналізу нормативних документів та експертним методом ранжування, може слугувати основою для розробки рекомендацій, спрямованих на вдосконалення конструктивних рішень, сертифікацію продукції, а також уможливлює створення зваженого та об'єктивного підходу до оцінки якості поясів пожежних рятувальних з метою забезпечення індивідуального захисту користувачів від падіння з висоти.

Постановка проблеми. Підвищення рівня пожежної безпеки має на меті захист людей, майна та природи від пожеж. Це включає запобігання, мінімізацію наслідків та готовність до їх ліквідації. Наука допомагає вдосконалювати політику в цій сфері. Пожежна безпека – це спільна відповідальність держави, місцевої влади, організацій та громадян. Саме тому важливою є ефективна їх взаємодія і співпраця.

Нормативно-правове регулювання показників якості та методів контролю якості пожежних поясів є важливим інструментом посилення пожежної безпеки в Україні. Чітко визначені вимоги до характеристик пожежних поясів та встановлені процедури їх контролю забезпечують належний рівень індивідуального захисту рятувальника. Ефективне правове поле в цій сфері сприяє запобіганню нещасних випадків під час гасіння пожеж та підвищує ефективність виконання пожежником покладених на нього обов'язків з ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питання посилення пожежної безпеки є сферою наукових інтересів багатьох сучасних науковців та експертів. Серед них можна виділити М. В. Андрієнка, А. В. Борисова, О. О. Черкасова та інші. Окремі аспекти застосування засобів індивідуального захисту рятувальників і пожежних розглядалися такими науковцями, як Кравченко, Р. І., Корольова, О. Г., Хроменков, Д. Г., Гулик, Ю. Б., Ільченко, Н. М. тощо [1].

Проте, з наукової точки зору, нормативно-правове регулювання окремих аспектів, зокрема й показників якості та методів контролю пожежних поясів, як важелів посилення пожежної безпеки в Україні поки що не стало предметом глибокого вивчення і потребує більш ретельного аналізу.

Формулювання цілей дослідження. Метою наукової статті є дослідження та вивчення нормативно-правової бази з питань регулювання показників якості та методів контролю пожежних поясів як інструменту підвищення пожежної безпеки в Україні для формування пропозиції щодо удосконалення нормативних вимог до пожежних поясів на державному рівні.

Виклад основного матеріалу. Пояс пожежний рятувальний являється важливою частиною спорядження, від якого безпосередньо залежить захист життя пожежного-рятувальника при використанні під час гасіння пожеж. Удосконалення поясу пожежного рятувального тісно пов’язано з розвитком пожежної техніки, методів пожежогасіння та модернізацією засобів захисту. Сучасні моделі поясу пожежного рятувального враховують досвід попередніх поколінь і значно покращують ефективність роботи пожежних-рятувальників. Щоб забезпечувати пожежному-рятувальнику максимальний рівень безпеки пояс пожежний рятувальний, як засіб індивідуального захисту, повинен відповідати певним вимогам. Він виготовляється із спеціальних матеріалів, здатних витримувати великі навантаження, що виникають під час роботи пожежного-рятувальника.

Для забезпечення безпеки та захисту здоров’я користувачів вимоги до розроблення та виробництва засобів індивідуального захисту, наявних на ринку в Україні, визначені у відповідному Технічному регламенті, розробленому на основі європейських стандартів, що відповідає директивам Європейського Союзу [2]. Його запровадження сприяє усуненню технічних бар’єрів у торгівлі та полегшує доступ українських засобів індивідуального захисту, зокрема й на міжнародні ринки. Даний Технічний регламент визначає засоби індивідуального захисту як спорядження, запроєктоване та виготовлене для носіння чи тримання пожежним-рятувальником з метою захисту від одного або більше ризиків з метою забезпечення його безпеки та захисту здоров’я. Відтак, спорядження пожежного-рятувальника – пояс пожежний рятувальний, повинен захищати користувача від ризику падіння з висоти, віднесеним цим Технічним регламентом до категорії ризику ІІІ. У контексті Технічного регламенту категорія ризику ІІІ визначає застосування поясу пожежного рятувального, що забезпечує високий рівень захисту користувачів в умовах гасіння пожежі.

Водночас, в Технічному регламенті засобів індивідуального захисту, переліку видів продукції, щодо яких органи державного ринкового нагляду здійснюють державний ринковий нагляд, стандартами та іншими нормативними документами не визначено класифікацію поясів пожежних рятувальних окремо для пожежних-рятувальників та рятувальників. Це означає, що пояси пожежні рятувальні вважаються одним і тим же спорядженням, як для пожежних-рятувальників, так і для рятувальників [1], без врахування кваліфікаційних характеристик професій. Адже, у Довіднику кваліфікаційних характеристик професій працівників у сфері цивільного захисту України [3] зазначено, що головні завдання пожежних-

рятувальників пов'язані з гасінням пожеж, розшуком у зоні надзвичайної ситуації, транспортуванням і евакуацією постраждалих з небезпечної зони, наданням їм домедичної допомоги, застосовуючи при цьому протипожежну техніку, пожежне устаткування, аварійно-рятувальний інструмент та спорядження. Натомість рятувальники виконують широкий спектр завдань, пов'язаних із пошуком і рятуванням людей, наданням допомоги постраждалим під час ліквідації різних аварійних ситуацій, наслідків надзвичайних ситуацій. Тому рятувальники оснащуються спеціальним спорядженням, що дозволяє їм безпечно виконувати роботи, зокрема на висоті, з високим ризиком для здоров'я та життя свого і оточуючих. Отже, різниця в кваліфікаційних вимогах до професій пожежного-рятувальника (код КП-5161) і рятувальника (код КП-5169) та передбачених завданнях і обов'язках, які повинні виконувати ці працівники, створюють потребу в більш диференційованому підході до вибору та застосування поясів пожежних рятувальних, як засобів їхнього захисту від ризику падіння з висоти.

Вимоги щодо засобів цивільного захисту, їх надання на ринку, введення в обіг, а також процедури оцінки відповідності таких засобів установлюються Технічним регламентом засобів цивільного захисту [4]. Дія даного Технічного регламенту поширюється на засоби рятування з висоти, зокрема пожежні, на які не поширюється дія Технічного регламенту засобів індивідуального захисту. Важливою характеристикою засобів цивільного захисту є захист життя і здоров'я персоналу, що користується такими засобами та виконує аварійно-рятувальні та інші невідкладні роботи, гасіння пожеж, а також людей, яких рятують.

Оскільки існують чіткі вимоги до завдань, обов'язків та кваліфікаційних вимог до пожежних-рятувальників [3], державою прийнято нормативні документи, що характеризують вимоги до поясів пожежних рятувальних.

Ключовим інструментом, що встановлює єдині вимоги до конструкції, матеріалів, експлуатаційних характеристик, методів випробовувань та номенклатуру показників якості для поясів пожежних рятувальних є чинний ДСТУ 4262:2003 [5], в якому зазначається, що пояс пожежний рятувальний призначений для страхування і саморятування пожежного-рятувальника, рятування людей під час гасіння пожежі та проведення пожежно-рятувальних робіт.

Варто зауважити, що в ДСТУ 2273:2006 [6] також установлено термін «пояс пожежника» серед інших термінів та визначення понять, що стосуються засобів індивідуального захисту. Такий пояс призначений «для закріплення і страхування пожежника під час його роботи на висоті, а також для проведення пожежно-рятувальних робіт та самоврятування» А отже, цим стандартом не передбачено, що пояс пожежний рятувальний може використовуватися з метою рятування людей під час гасіння пожежі та проведення пожежно-рятувальних робіт, на відміну від ДСТУ 4262:2003 [5].

Згідно зі стандартом ДСТУ 4262:2003, пояси пожежні рятувальні за конструктивним виконанням поділяються на: пояси без страхувальної системи – тип А; пояси зі страхувальною системою – тип Б. Пояси пожежні рятувальні цих типів складаються із поясового паска, пряжки, карабінотримача, застібки, хомутика, страхувальної системи. У свою чергу до страхувальної системи входять: страхувальне кільце, фал довжиною від 800 мм до 1500 мм, амортизатор та підсумок, завдяки чому вага поясу типу Б на 0,4 кг більше за вагу поясу типу А. Конструкція поясу пожежного рятувального включає самозатягувальну пряжку, що, працює за принципом затягування по всій ширині поясового паска. Це забезпечує надійну фіксацію та запобігає прослизанню поясового паска під навантаженням. Поясовий пасок з

термостійким просоченням зберігає свої властивості протягом усього терміну експлуатації.

Також передбачено, що на поясі пожежному рятувальному можуть кріпитись пожежна сокира та пожежний карабін. При цьому на технічні пристрої, що приєднуються до поясу пожежного рятувального згаданий національний стандарт не поширюється.

Технічні вимоги до поясу пожежного рятувального показують наскільки ефективно, безпечно та надійно він експлуатуватиметься протягом усього терміну користування. До загальних технічних вимог, які становлять сукупність властивостей і параметрів поясів пожежних рятувальних, визначають їх здатність виконувати задані функції в умовах реальної експлуатації, належать: характеристики (призначення, надійність, стійкість до зовнішніх впливів, конструктивні вимоги); вимоги до матеріалів та купованих виробів; комплектність; маркування; пакування.

Залежно від виду випробовування (приймально-здавальне, періодичне, сертифікаційне, на надійність) пояси пожежні рятувальні випробовують відповідно до переліку показників якості та відповідних методів. Метою таких випробовувань є визначення відповідності поясів пожежних рятувальних вимогам стандарту [5]. До основних методів випробовування поясу належать: визначення зовнішнього вигляду, розмірів та маси; видовження під час дії випробовувальної статистичної навантаги; стійкості щодо дії статичної навантаги та дії динамічної навантаги; максимального зусилля в момент динамічного ривка; стійкості щодо дій граничних температур експлуатування, температури 200 °С та теплового випромінювання; стійкості матеріалу поясового паска щодо дії відкритого полум’я; стійкості щодо дії води та поверхнево-активних речовин; стійкості фала до дії температури 600 °С, до дії теплового випромінювання, після дії відкритого полум’я, дії гарячого предмета; жорсткості фала; показників надійності; перевіряння відповідності матеріалів та купованих виробів. Усього державний стандарт передбачає застосовність шістнадцяти показників якості до поясів без страхувальної системи (тип А) та двадцяти двох показників якості до поясів зі страхувальною системою (тип Б) [5].

З огляду на вимоги ДСНС, які визначають забезпечення речовим майном і табельну належність, витрати, терміни експлуатації індивідуального оснащення та спорядження (норма 33.8) [7], поясом пожежним рятувальним, забезпечуються:

особовий склад караулів пожежно-рятувального підрозділу (крім осіб, котрі перебувають на посаді водія та диспетчера (радіотелефоніста);

особи, які отримали у встановленому порядку допуск до самостійного виконання обов’язків керівника гасіння пожежі;

інші особи рядового і начальницького складу служби цивільного захисту, працівники та державні службовці апарату ДСНС, які беруть безпосередню участь у координації проведення пожежно-рятувальних робіт; відповідальні за взаємодію із засобами масової інформації, комунікації із громадськістю; здійснюють висвітлення пожежно-рятувальних робіт у засобах масової інформації.

Щоденно на цілодобовому чергуванні по всій країні перебуває близько 11 тисяч особового складу ДСНС, готових до оперативного реагування на різного роду пожеж і надзвичайних ситуації, надання допомоги громадянам, які цього потребують. У разі необхідності ця кількість може збільшуватися. Відповідно особовий склад, що перебуває на цілодобовому чергуванні і залучається до гасіння пожеж, забезпечується індивідуальним поясом пожежним рятувальним, що має відповідати зросту та статурі користувача.

Сучасні регулювання нормативних актів враховують європейські технічні вимоги та методи випробовувань засобів індивідуального захисту користувачів, забезпечуючи гармонізацію стандартів безпеки, загалом підвищуючи

ефективність виконання завдань за призначенням. Починаючи з 1992 року, опубліковано низку європейських стандартів та проектів стандартів, що стосуються індивідуального спорядження для захисту від падіння. Більшість з них – це стандарти на вироби, які визначають вимоги до них та методи випробування компонентів (ДСТУ EN 1497:2017 «Індивідуальне спорядження для захисту від падіння. Рятувальні ремені», ДСТУ EN 354:2017 «Індивідуальне спорядження для захисту від падіння. Стропи», ДСТУ EN 355:2017 «Індивідуальне спорядження для захисту від падіння з висоти. Амортизатори», ДСТУ EN 358:2022 «Індивідуальне спорядження для захисту від падіння з висоти. Пояси та стропи для утримування або обмежування», ДСТУ EN 361:2017 «Індивідуальне спорядження для захисту від падіння з висоти. Спорядження для всього тіла», ДСТУ EN 362:2017 «Індивідуальне спорядження для захисту від падіння з висоти. З`єднувачі», ДСТУ EN 363:2017 «Індивідуальне спорядження для захисту від падіння. Системи індивідуального захисту від падіння», ДСТУ EN 364-2001 «Індивідуальне спорядження для захисту від падіння з висоти. Методи випробовування», ДСТУ EN 365:2017 «Індивідуальне спорядження для захисту від падіння з висоти. Загальні вимоги до інструкцій щодо використання, технічного обслуговування, періодичного перевіряння, ремонтування, маркування та пакування»).

Відповідно до ДСТУ 7239:2011 «Система стандартів безпеки праці засоби індивідуального захисту» засоби захисту від падіння поділяються на:

пояси запобіжні (лямкові, безлямкові, комбіновані) використовуються рятувальниками, промислові альпіністами, спелеологами, працівники інших категорій, які виконують роботи на висоті або в умовах підвищеної небезпеки;

оснащення, призначене для попередження падіння (карабіни, стропи, строп-канати, рятувальні канати, троси);

стримувальне та страхувальне обладнання – повне оснащення з усім приладдям (зажими страхувальні, зачіпи, системи страхування, блокувальні пристрої);

запобіжні пристрої, які гасять кінетичну енергію – повне оснащення з усім приладдям (системи обмежування падіння, спускові пристрої)

Наразі є чинним стандарт, який охоплює вимоги до систем, а саме ДСТУ EN 363:2017 [8], в якому надано визначення та загальні вимоги, які необхідно враховувати під час об’єднання компонентів у системи зупинення падіння. У цьому стандарті наведено характеристики та принципи монтування всіх типів систем індивідуального захисту від падіння загалом, а також для конкретних форм систем індивідуального захисту від падіння, а саме і систем обмежування, утримування, зупинення падіння, канатного доступу та порятунку. Означений стандарт не конкретизує використання систем індивідуального захисту від падіння, але наведені рекомендації та приклади надано на основі загальної практики використання систем індивідуального захисту від падіння.

Методи випробовування, маркування та інформацію, яку надає виробник для рятувальних ременів, що використовуються тільки для виконання рятувальних робіт, установлені ДСТУ EN 1497:2017 [8]. Цьому стандарту відповідають рятувальні ремені, як складники рятувальних систем, які є системами індивідуального захисту від падіння з висоти. Рятувальну систему (rescue system) цей стандарт визначає як індивідуальну систему захисту від падіння, за допомогою якої рятувальник може врятувати себе або інших осіб через запобігання падінню.

Отже, рятувальний ремінь, це засіб для підтримування тіла з метою порятунку, що охоплює ремені, фітинги, пряжки або інші елементи, належно розташовані та змонтовані, щоб утримувати тіло людини у відповідному положенні під час рятування.

Якщо роботи, які виконують на висоті, мають короткочасний характер, або з технічних причин неможливо забезпечити робочу платформу, належні огорожі та інші подібні засоби захисту, запобігання падінню з висоти за належного виконання відповідної роботи можна досягти використанням індивідуального захисного спорядження, яке виготовлено відповідно до стандарту [9]. Стандарт поширюється на пояси та стропи, призначені для утримування або обмежування. Таке спорядження призначено для запобігання потраплянню користувача в положення, за якого може відбутися падіння (обмежування), або забезпечення безпеки користувача в положенні на місці виконання робіт так, щоб користувач міг розподіляти і контролювати вагу між талією та ногами (утримування).

У цьому стандарті встановлено вимоги, випробування, маркування та інформацію, яку надає виробник.

ДСТУ EN 361:2017 [8] установлює технічні вимоги, методи випробування, маркування, інформацію, яку надає виробник, і паковання для спорядження для всього тіла. Означений засіб призначений для підтримування тіла й зупинення падіння, може охоплювати ремені, фітинги, пряжки або інші елементи, відповідно пристосовані та змонтовані.

ДСТУ EN 364-2001 [10] установлює методи випробовування матеріалів, компонентів і систем зв’язаних з устаткованням для захисту від падіння: методи статичних випробовувань; методи випробовування динамічних робочих характеристик і випробовування на динамічну міцність компонентів і систем; методи випробовування на корозію металевих компонентів; методи витримування та випробовування на довговічність.

Для зменшення кількості зразків, необхідних для виконання програми випробовування, рекомендується, там де це можливо, враховувати певну послідовність випробовування, зокрема: випробовування на стійкість до корозії; випробовування динамічних характеристик; випробовування на динамічну міцність; випробовування на статичну міцність.

Використовуючи експертний метод ранжування, заснований на процедурі розташування будь-яких об’єктів у порядку зростання або спаданням за певною ознакою [11], виокремимо уніфіковану номенклатуру показників якості означених поясів, характеристики яких відіграють ключову роль у забезпеченні індивідуального захисту від падіння. Це означає, що ми виберемо показники якості поясів, які мають таке ж або подібне значення в представлених нормативних документах, і будуть використовуватися для забезпечення узгодженості вимог.

Аналізуючи виокремлені уніфіковані показники якості поясів можна зробити спостереження про те, що загалом, вони є критично важливими для забезпечення якості, безпеки та надійності поясів, що, в свою чергу, впливає на загальний рівень безпеки користувачів (табл. 1). Так, перший показники якості поясів: «Обстеження дизайну, ергономіки, матеріалу та конструкції», підкреслює важливість зазначених елементів, що безпосередньо впливають на комфорт користувача та правильність їх використання, що, в свою чергу, може запобігти потенційним травмам або неправильному використанню. Другий показник: «Випробовування на статичну міцність» - забезпечує оцінювання здатності поясів витримувати статичні навантаження без структурних пошкоджень, що є критичним для запобігання аварійним ситуаціям. Наступний: «Випробовування на динамічну міцність» - забезпечує здатність поясів витримувати динамічні навантаження, такі як різкі рухи або ривки, що є важливим для забезпечення безпеки в динамічних умовах забезпечує перевіряння, наскільки матеріали поясів стійкі до корозії, що впливає на їхню

довговічність та здатність зберігати свої властивості в різних умовах експлуатації.

Таблиця 1 – Уніфіковані показники якості поясів та їх характеристики

№ з/п	Показники якості поясів	Категорія	Вплив на безпеку та надійність
1.	Обстеження дизайну, ергономіки, матеріалу та конструкції	Функціональність та зручність	Визначає комфорт, сумісність та правильність використання
2.	Випробовування на статичну міцність	Фізична міцність	Забезпечує витримування навантажень без руйнування
3.	Випробовування на динамічну міцність	Фізична міцність	Гарантує стійкість до ривкових навантажень
4.	Випробування на стійкість до корозії	Довговічність матеріалів	Захищає від руйнування під впливом зовнішніх факторів

Висновки та напрями подальших досліджень. Отже, уніфікована номенклатура показників якості поясів, що використовуються в різних галузях економіки, встановлена на основі аналізу нормативних документів та експертним методом ранжування, може слугувати основою для розробки рекомендацій, спрямованих на вдосконалення конструктивних рішень, сертифікацію продукції, а також уможливлює створення зваженого та об’єктивного підходу до оцінки якості поясів пожежних рятувальних з метою забезпечення індивідуального захисту користувачів, наприклад від падіння з висоти.

Аналіз стану дослідження нормативно-правової бази засвідчив, що незважаючи на низку досліджень різних аспектів, науковий аналіз даної тематики залишається актуальним і потребує окремого комплексного дослідження, ураховуючи кардинальні зміни. Зокрема доопрацювання понятійно-категоріального апарату, перегляд якісних характеристик поясів пожежних і відповідно методів їх контролю, удосконалення випробувального обладнання тощо.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кравченко, Р. І., Корольова, О. Г., Хроменков, Д. Г., Гулик, Ю. Б., & Ільченко, Н. М. Класифікація засобів індивідуального захисту рятувальників і пожежних. матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми надзвичайних ситуацій». Харків. 2020. С 185.
2. Про затвердження Технічного регламенту засобів індивідуального захисту: постанова Кабінету Міністрів України від 21.08.2019 № 771. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/771-2019-%D0%BF#Text 28.08.2026.
3. Про затвердження Довідника кваліфікаційних характеристик професій працівників у сфері цивільного захисту: наказ Державної служби України з надзвичайних ситуацій від 05.12.2018 № 707. URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0707388-18#Text.
4. Про затвердження Технічного регламенту засобів цивільного захисту: постанова Кабінету Міністрів України від 26.05.2023 № 535. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/535-2023-%D0%BF#Text.
5. ДСТУ 4262:2003 «Пояси пожежні рятувальні. Загальні технічні вимоги та методи випробовування». [Чинний від 2004-10-01]. Київ : Держстандарт України, 2003. 22 с.
6. ДСТУ 2273:2006 Протипожежна техніка. Терміни та визначення основних понять. наказ від 29.06.2006 № 177.
7. Норми забезпечення речовим майном і табельної належності, витрат і термінів пожежно-рятувальної та аварійно-рятувальної техніки, експлуатації пожежно-рятувального, технологічного і гаражного обладнання, інструменту, індивідуального оснащення та спорядження, ремонтно-експлуатаційних матеріалів, меблів та інвентарю підрозділів ДСНС України та установ і організацій сфери управління ДСНС: наказ Державної служби України з надзвичайних ситуацій від 29.03.2024 № 349. URL: https://ck.dsns.gov.ua/upload/2/1/9/5/9/8/2/normi-tabelnoyi-naleznosti-dlia-zatv-fin.pdf.
8. Про прийняття національних нормативних документів, гармонізованих з європейськими та міжнародними нормативними документами, скасування чинності національних нормативних документів, зміни та поправок до національних нормативних документів: наказ Державного підприємства «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» від 12.12.2017 № 409. URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0409774-17#Text.
9. Про прийняття та скасування національних стандартів: наказ Державного підприємства «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» від 26.12.2022 № 271. URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0271774-22#Text.
10. Про затвердження Переліку національних стандартів, добровільне застосування яких може сприйматися як доказ відповідності засобів захисту вимогам Технічного регламенту засобів індивідуального захисту: наказ Міністерства економічного розвитку і торгівлі України від 10.12.2013 № 1462. URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va462731-13#Text.

11. Ярощук Л.Д. Експертні методи в автоматизованих системах керування : Формування та напрями використання експертних знань : навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Л. Д. Ярощук. 2-ге вид. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 43 с.

REFERENCES

1. Kravchenko, R. I., Korolova, O. H., Khromenkov, D. H., Hulyk, Yu. B., Ilchenko, N. M. (2020) Klasyfikatsiia zasobiv indyvidualnoho zakhystu riatuvalnykiv i pozhezhnykh [Classification of personal protective equipment for rescuers and firefighters]. Materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Problemy nadzvychainykh sytuatsii». Kharkiv. (in Ukrainian).
2. On approval of the Technical Regulations for personal protective equipment: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine № 771 (2019, August 21) URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/771-2019-%D0%BF#Text 28.08.2026.
3. On approval of the Handbook of qualification characteristics of professions of workers in the field of civil protection: order of the State Emergency Service of Ukraine №707 (2018, December 5) URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0707388-18#Text.
4. On approval of the Technical Regulations for Civil Defense Means: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine № 535 (2023, May 26) URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/535-2023-%D0%BF#Text.
5. Firefighters' rescue belts. General technical requirements and test methods. (2003). DSTU 4262:2003. Kyiv: Derzhstandart Ukraine. (in Ukrainian).
6. Firefighting equipment. Terms and definitions of basic concepts. (2006). DSTU 2273:2006. Kyiv: Derzhstandart Ukraine. (in Ukrainian).
7. Norms for providing material property and personnel, costs and terms of fire-rescue and emergency rescue equipment, operation of fire-rescue, technological and garage equipment, tools, individual equipment and gear, repair and maintenance materials, furniture and inventory of units of the State Emergency Service of Ukraine and institutions and organizations under the management of the State Emergency Service of Ukraine: order of the State Emergency Service of Ukraine № 349 (2024, March 29) URL: https://ck.dsns.gov.ua/upload/2/1/9/5/9/8/2/normi-tabelnoyi-naleznosti-dlia-zatv-fin.pdf.
8. On the adoption of national regulatory documents harmonized with European and international regulatory documents, the cancellation of the validity of national regulatory documents, changes and amendments to national regulatory documents: order of the State Enterprise "Ukrainian Research and Training Center for Standardization, Certification and Quality" № 409 (2017, December 12) URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0409774-17#Text.
9. On the adoption and cancellation of national standards: : order of the State Enterprise "Ukrainian Research and Training Center for Standardization, Certification and Quality" № 271 (2022, December 26) URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0271774-22#Text.
10. On approval of the List of national standards, the voluntary application of which may be perceived as proof of compliance of protective equipment with the requirements of the Technical Regulations on Personal Protective Equipment: Order of the Ministry of Economic Development and Trade of Ukraine № 1462 (2013, December 10) URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va462731-13#Text.
11. Yaroshchuk L.D. (2022) Ekspertni metody v avtomatyzovanykh systemakh keruvannia : Formuvannia ta napriamy vykorystannia ekspertnykh znan [Expert methods in automated control systems: Formation and directions of use of expert knowledge] 2-he vyd. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho. 43 s. (in Ukrainian).

REGULATORY AND LEGAL FRAMEWORK FOR QUALITY INDICATORS AND QUALITY CONTROL METHODS OF FIRE BELTS AS A TOOL FOR ENHANCING FIRE SAFETY IN UKRAINE

Yu. Kravchenko, V. Mykhailov, S. Pavlov

Institute of Scientific Research on Civil Protection of the National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine

KEYWORDS:

fire safety, fire belts, mechanisms of state regulation, civil protection.

ABSTRACT

The article analyzes the current regulatory legal acts in Ukraine and European standards that define the concept of "fire belts" and the requirements for their performance indicators and testing methods. Fire belts are a critical component of the personal protective equipment used by firefighters and rescuers to ensure their safety while working at height or under extreme conditions. The study identifies and systematizes the key testing methods that determine the quality and reliability of these belts.

The primary testing methods include: visual inspection and measurement of dimensions and weight; elongation under the influence of test static load; resistance to static and dynamic loads; measurement of the maximum force at the moment of a dynamic jerk; resistance to extreme operational temperatures, including exposure to 200 °C and thermal radiation; flame resistance of the belt strap material; resistance to water and surfactants; durability of the rope when exposed to 600 °C, thermal radiation, open flame, and contact with a hot object; stiffness of the rope; reliability indicators; and verification of compliance of materials and purchased components with the applicable technical requirements.

The results of the study show that a unified nomenclature of quality indicators for fire belts, developed on the basis of normative document analysis and expert ranking methodology, can serve as a foundation for improving design solutions, facilitating product certification, and creating a transparent and objective approach to evaluating the quality of fire rescue belts. Such an approach is essential for ensuring the individual protection of personnel from falling during emergency response and rescue operations. The findings may also support the development of national standards harmonized with European practices, strengthening the overall fire safety system in Ukraine.

УДК 614.841

УДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ СИСТЕМИ «ЗАЛІЗОБЕТОННА КОЛОНА–ПЕРЕКРИТТЯ»

https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.1.(19).97-108

Майборода Р. І., ORCID iD 0000-0002-3461-2959
Отрош Ю. А., ORCID iD 0000-0003-0698-2888
*E-mail: maiboroda.roman@gmail.com

Національний університет цивільного захисту України, Україна, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ
Надійшла до редакції: 30.04.2025
Пройшла рецензування: 16.05.2025

КЛЮЧОВІ СЛОВА:
теплопровідність, пожежа, залізобетон, вузол з'єднання, контактна теплопровідність, прогресуюче обвалення

АНОТАЦІЯ
У статті представлено удосконалену математичну модель теплопровідності в системі «залізобетонна колона–перекриття» при пожежі, яка враховує просторову теплову взаємодію конструктивних елементів, тепловий контакт у зоні вузла та механізм взаємного опромінювання. Модель є суттєвим розширенням класичного підходу, у якому конструкції розглядаються переважно як пасивні об'єкти поглинання тепла. Запропонований підхід враховує, що нагріті поверхні є додатковими джерела випромінювання, що сприяє підвищенню температури конструкцій в близькій зоні з'єднання, а також одночасно охолоджуються через теплові втрати на взаємне опромінення. Обчислення взаємного опромінювання між поверхнями в моделі реалізовано з урахуванням коефіцієнта бачення та відстаней між поверхнями. Представлено опис теплового контакту через коефіцієнт контактного теплообміну, що враховує характер зчеплення, щільність монолітного стику. В результаті модель дозволяє точно відобразити розподіл температури в місці з'єднання конструкцій, включаючи додатковий локальний нагрів за рахунок взаємного опромінення. Результати чисельного аналізу показали, що в зоні до 0,5 м від стику додаткове випромінювання колони може підвищувати температуру перекриття на 20–40 °С порівняно з моделями без урахування цієї взаємодії, що знижує вогнестійкість плити на 5-10 %. Врахування цього ефекту є особливо важливим у розрахунках стійкості до прогресуючого обвалення будівель внаслідок пожежі, оскільки перевищення критичних температур у зоні з'єднання конструкцій значно підвищує ймовірність руйнування несучих елементів. Таким чином, удосконалена модель забезпечує комплексне чисельне представлення температурних полів в умовах пожежі з урахуванням конструктивної взаємодії, теплового контакту, взаємного опромінення та впливу на ймовірність розвитку прогресуючого обвалення в монолітних залізобетонних будівлях. Практична реалізація можлива в чисельних програмних середовищах, таких як ЛІРА-САПР, ANSYS.

Постановка проблеми. У більшості існуючих розрахункових моделей визначення температурного впливу від пожежі на елементи конструкції, зокрема, для колон та перекриття – розглядаються окремо. Вузли жорсткого з'єднання при цьому спрощуються або ігноруються, що суперечить реальній фізичній картині. У стикових зонах спостерігається посилена теплопередача та утворення локальних температурних піків, які істотно впливають на загальний температурний стан і зниження дійсної несучої здатності конструкції. Пропонується розв'язання цієї проблеми шляхом розробки удосконаленої математичної моделі теплопередачі із урахуванням контактної взаємодії у вузлу

та взаємного опромінення між суміжними внутрішніми поверхнями, що суттєво підвищить ризик руйнування конструкцій та настання прогресуючого обвалення.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Проблема стійкості залізобетонних конструкцій внаслідок дії пожеж розглядалася в численних дослідженнях, проте більшість із них фокусуються на окремих елементах без урахування теплової взаємодії в зонах з'єднання. Класичні підходи до аналітичного опису теплопереносу в конструкційних матеріалах були закладені в роботі [1], де обґрунтовано диференціальні рівняння теплопровідності з урахуванням властивостей матеріалів. У той час, як це дослідження формалізувало методи для окремих елементів, воно не охоплює специфіку стикових зон.

У дослідженні [2] розглянуто температурний розподіл у залізобетонних колонах, а також вивчено граничні температури руйнування бетону. Роботи [3,4] суттєво розвинули напрям математичного моделювання вогнестійкості з урахуванням температурозалежних властивостей матеріалів, фазових переходів у бетоні та впливу тривалості пожежі. Особливо варто відзначити роботу [4], де моделюється структурна поведінка перекриттів в умовах пожежі із порівнянням числових та експериментальних даних.

Попри значний розвиток моделей теплопередачі, нормативний документ [5] подає лише загальні положення щодо моделювання меж вогнестійкості, не деталізуючі опис теплової взаємодії у вузлах з'єднання конструкцій. Аналогічно, у [6], який регламентує навантаження від стандартної пожежі, вказується лише температурна крива без методики оцінки локального теплового ефекту у з'єднаннях.

Системні підходи до моделювання впливу пожежі на конструкції будівель були започатковані в роботах авторів [7], які показали важливість температурного впливу на втрату стійкості та початок прогресуючого обвалення. Однак і в цьому підході зона контакту між елементами розглядається як ізотропна область, що не відображає фізичної складності теплових процесів.

Серед українських джерел варто відзначити дослідження [8], які вказують на важливість вивчення температурного стану вузлових з'єднань у багатоповерхових монолітних будівлях. Автори підкреслюють, що саме температурна концентрація в стиках може бути критичною для втрати стійкості, але подають висновки без чисельної реалізації відповідної моделі.

Особливу увагу слід звернути на дослідження радіаційного теплообміну при пожежі між близько розташованими конструкціями поверхонь, оскільки саме взаємне опромінення в зоні вузла є додатковим критерієм локального перегріву. У роботі [9] розглянуто радіаційний обмін у межах розрахункової камери з аналітичним визначенням коефіцієнтів взаємного бачення (view factors), які визначають інтенсивність теплообміну. Результати моделювання температурного впливу в зонах з порожнистими блоками з урахуванням радіаційної передачі тепла – їх результати показали, що взаємне опромінення є досить суттєвим для його врахування в умовах високих температур [10].

Огляд іноземних та вітчизняних джерел, демонструє відсутність та необхідність дослідження процесів теплопередачі в зоні «колона–перекриття» з врахуванням контактної теплопередачі, зміни теплофізичних властивостей матеріалів за підвищених температур, взаємне радіаційне опромінення та інше. Дослідження мають практичну цінність для підвищення точності оцінювання вогнестійкості конструкцій для системи будівлі в цілому, в тому числі і при оцінці стійкості до прогресуючого обваленню залізобетонних будівель внаслідок пожежі.

Попри наявність широкого спектра теоретичних і експериментальних досліджень вогнестійкості залізобетонних конструкцій, значна частина робіт орієнтована на ізольоване вивчення

теплопередачі в окремих елементах – балках, колонах, плитах – без урахування їх взаємодії в умовах пожежі. Такий підхід істотно спрощує фізичну модель і не дозволяє врахувати критичні локалізовані ефекти, зокрема в зонах контакту стиків.

Особливо актуальною залишається проблема відсутності моделей, які б комплексно враховували контактний теплообмін між суміжними конструктивними елементами з неоднорідним температурним полем; радіаційний теплообмін між поруч розташованими поверхнями, де відстань між елементами є мінімальною, що зумовлює підвищення температури.

Таким чином, існує обґрунтована проблема у створенні удосконаленої математичної моделі, яка поєднує відомі механізми теплового впливу пожежі на залізобетонні конструкції, враховує розподіл температурних полів у зоні вузла типу «колона–перекриття» як єдина розрахункова область, враховує контактну теплопередачу між суміжними елементами, включає взаємне радіаційне опромінення між внутрішніми поверхнями які перебувають у візуальному контакті. Розробка такої моделі дозволить забезпечити більш точну оцінку вогнестійкості залізобетонних конструкцій, визначити критичні температурні поля в стикових зонах та прогнозувати умови втрати стійкості конструкцій при пожежі.

Формулювання цілей досліджень. Метою дослідження є побудова математичної моделі нестаціонарної теплопередачі в зоні з'єднання «колона–перекриття» при пожежі, що дозволяє враховувати теплову взаємодію між елементами, зміну теплофізичних параметрів матеріалів за підвищених температур та характер нагріву. Особливий акцент зробити на врахуванні контактного теплообміну між конструкціями та взаємне опромінення суміжних ділянок.

У моделі реалізовано сценарій впливу стандартної пожежі, визначені розподіли температур у часі й просторі, які можуть надалі порівнюватися з граничними температурами втрати міцності бетоном й арматурою. Досягнення критичних значень у зоні з'єднання розглядається як потенційна умова для втрати несучої здатності вузла з'єднання та ініціації прогресуючого обвалення. Розв'язання задачі виконується чисельно з використанням методу скінченних елементів, що забезпечує застосування розробленої моделі в розрахунках.

Методи дослідження. Для побудови удосконаленої моделі використано аналітичний підхід, заснований на класичних рівняннях теплопровідності (закон Фур'є), теплового випромінювання (закон Стефана–Больцмана), конвективного обміну (закон Ньютона) та контактного теплообміну. На цій основі запропоновано нову фізико-математичну постановку задачі, що враховує сумісну та просторову взаємодію елементів конструкції в умовах пожежі.

Виклад основного матеріалу. У рамках задачі розглядається нестаціонарна теплопередача у системі двох з'єднаних залізобетонних елементів (колона і перекриття), які піддаються дії високих температур у процесі пожежі. Початкова модель описує зміну температури в кожній точці конструкції як функцію координат і часу.

Початкові умови (для всієї системи):

$$T = T(x, y, z, t), \forall (x, y, z) \text{ в області } \Omega \quad (1)$$

де,

$T = T(x, y, z, t)$ – температурне поле, що змінюється у просторі (x, y, z, t) та часі t, K;

(x, y, z) – просторові координати в тривимірному декартовому просторі, м;

t – час, що відображає тривалість теплового впливу, с;

Ω – область, яка відповідає об'єму конструкції.

Розв'язується диференціальне рівняння теплопровідності з урахуванням зміни від температури властивостей матеріалів:

$$\rho(T) \cdot c(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda(T) \cdot \nabla T), \text{ в області } \Omega \quad (2)$$

$\rho(T)$ – густина матеріалу, кг/м³;

$c(T)$ – питома теплоємність матеріалу як функція температури, Дж/(кг·К);

$\lambda(T)$ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, що залежить від температури, Вт/(м·К);

$\frac{\partial T}{\partial t}$ – температура бетону у точці (x, y) в момент часу t;

$\nabla \cdot (\lambda(T) \cdot \nabla T)$ – оператор дивергенції, що описує тепловий потік у середовищі;

∇T – градієнт температури в просторі;

Ω – розрахункова область.

Граничні умови на зовнішній поверхні бетонної конструкції, яка піддається вогневому впливу:

$$-\lambda_c \frac{\partial T_c}{\partial \vec{n}}|_{\delta\Omega} = q_{rad} + q_{conv}, \quad (3)$$

де,

λ_c – коефіцієнт теплопровідності бетону, Вт/(м·К);

$\vec{n}$ – нормальний вектор до поверхні конструкції, направлений всередину до її осі;

q_{rad}, q_{conv} – променева і конвекційна складові щільності теплового потоку, що припадає на зовнішню поверхню конструкції, Вт/м^2.

Граничні умови з необігрівної поверхні конструкцій:

$$-\lambda_c \frac{\partial T_c}{\partial \vec{n}}|_{\delta\Omega} = q_{rad} + q_{conv}, \quad (4)$$

Щільність теплового потоку конвекцією визначається законом Ньютона:

$$q_{conv} = \alpha(T_a - T_c), \quad (5)$$

де,

α – коефіцієнт конвекційного теплообміну, Вт/(м^2·К);

T_a – температура повітря в точці контакту з конструкцією, К;

T_c – температура в даній точці на поверхні конструкції, К.

Щільність теплового потоку випромінюванням визначається законом Стефана–Больцмана:

$$q_{rad} = c_0 \varepsilon_c \varepsilon_f \left[\left(\frac{T_f}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right] \psi, \quad (6)$$

де,

c_0=5,67 Вт/(м^2·К^4) – стала Стефана-Больцмана;

ε_c, ε_f – ступені чорноти конструкції і полум'я відповідно;

T_f – температура випромінюючої поверхні полум'я, К;

ψ – коефіцієнт взаємного опромінення між даною точкою на поверхні конструкції і полум'ям.

Отже, диференціальне рівняння в частинних похідних параболічного типу (2), крайовою умовою на зовнішній поверхні бетону (3), (4) і початковими умовами (1), визначають динаміку зміни температури в залізобетонній конструкції в умовах теплового впливу пожежі (5), (6). Розв'язання даної крайової задачі дозволяє знайти значення температури в довільній точці конструкції в заданий момент часу.

Початкова математична модель теплопередачі в залізобетонних конструкціях, яка враховує лише внутрішню теплопровідність, теплоємність та зовнішній тепловий вплив від пожежі (конвекція й випромінювання), є недостатньою для достовірного прогнозування температурного стану конструктивних вузлів. Вона не враховує теплову взаємодію між елементами системи, зокрема передачу тепла через контактні поверхні (колона–перекриття) та взаємне інфрачервоне випромінювання між вже нагрітими елементами.

Це призводить до спрощення задавання температурного поля в зоні стику, спотворення результатів термомеханічного аналізу та, як наслідок, до потенційного недооцінювання або переоцінювання несучої здатності конструкцій в умовах пожежі.

Для розв'язання проблеми недостатньої точності початкової моделі теплопередачі, яка не враховує взаємодію між елементами (колона–перекриття) та взаємне опромінення, необхідно виконати комплекс удосконалень на рівні фізичної та математичної постановки задачі:

– виконати спільну геометричну модель конструктивної системи (розглядати колону та перекриття як єдину розрахункову область з чітко визначеною контактною межею β, визначити поверхні, які піддаються впливу вогню);

– ввести умову теплової взаємодії між елементами (контактна теплопередача в місці з'єднання, взаємне випромінювання між нагрітими пожежею колоною та перекриття на певній ділянці).

Врахування локального теплообміну в зоні контакту.

Графічне представлення розширеної теплової моделі, в якій відображено основні механізми теплопровідності в зоні вузла типу «залізобетонна колона–перекриття» під час дії пожежі (рис. 1). Схема ілюструє комбінацію конвективного та радіаційного теплового впливу на відкриті поверхні елементів. У збільшеному фрагменті вузла праворуч деталізовано процес локального теплообміну в зоні контакту, який формалізується через коефіцієнт β – узагальнений параметр, що характеризує інтенсивність передачі тепла між колоною та перекриттям на межі їх сполучення. Така модель забезпечує більш точне прогнозування розподілу температурних полів у сумісній конструкції.

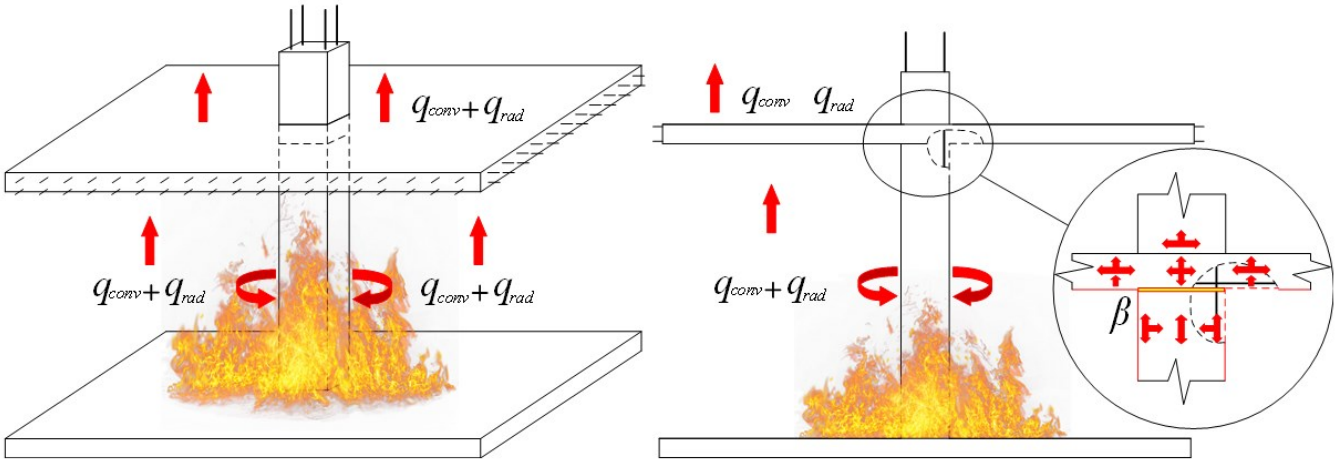


Рисунок 1 – Схематичне зображення механізмів теплопередачі в зоні вузла «залізобетонна колона–перекриття» під час пожежі з урахуванням конвективного, радіаційного впливу та контактного теплообміну, формалізованого через коефіцієнт β.

Умова теплової взаємодії між елементами.

Початкові умови (для системи колона-перекриття):

$$T = T(x, y, z, t), \ \forall (x, y, z) \in \Omega_c \cup \Omega_s \tag{7}$$

де,

$T = T(x, y, z, t)$ – температурне поле, що змінюється у просторі (x, y, z) та часі t, К;

(x, y, z) – просторові координати в тривимірному декартовому просторі, м;

t – час, що відображає тривалість теплового впливу, с;

Ω_c – область, яка відповідає об'єму залізобетонної колони;

Ω_s – область, яка відповідає об'єму залізобетонного перекриття (плити);

$\Omega_c \cup \Omega_s$ – єдина розрахункова область, яка включає обидва конструктивні елементи – колону та плиту.

Рівняння теплопровідності для кожного елемента:

–для залізобетонної колони:

$$\rho_c(T) \cdot c_c(T) \cdot \frac{\partial T_c}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_c(T) \cdot \nabla T_c) \, , \forall \, x \in \, \Omega_c \, t \, > 0 \tag{8}$$

– для залізобетонного перекриття:

$$\rho_s(T) \cdot c_s(T) \cdot \frac{\partial T_s}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_s(T) \cdot \nabla T_s), \forall \, x \in \, \Omega_s \, t \, > 0 \tag{9}$$

$\rho_{c,s}(T)$ – густина для колони та перекриття, кг/м^3;

$c_{c,s}(T)$ – теплоємність колони та перекриття, Дж/кг · К;

$\lambda_{c,s}(T)$ – коефіцієнти теплопровідності колони та перекриття, Вт/м · К;

$T_{c,s}$ – температура у відповідному елементі, К;

Ω_c, Ω_s – просторові області колони та перекриття відповідно.

Граничні умови на зовнішній поверхні бетонної конструкції, яка піддається вогневому впливу:

$$-\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} = \; q_{conv} + q_{rad} \, , \tag{10}$$

або

$$-\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} = \; \alpha \cdot \left(T_g(t) - T\right) + \, \varepsilon \, \cdot \, \sigma \, \cdot \left(T_g(t)^4 - T^4\right), \tag{11}$$

де

α – коефіцієнт конвекційного теплообміну, Вт/(м^2·К);

ε – коефіцієнт випромінювання;

σ – 5,67 · 10^{-8} Вт/(м^2·К^4) – стала Стефана–Больцмана;

$T_g(t)$ – температура газів за стандартною кривою пожежі, К;

T – початкова температура поверхні, К.

Стандартний температурний режим при пожежі має наступний вираз [6]:

$$T_g(t) = \; 20 \; + \; 345 \; \cdot \; log_{10}(8t \; + 1), \tag{12}$$

де

t – час пожежі.

Умова теплового контакту на межі колона–перекриття (поверхня контакту), набуває наступного вигляду C_{cs}:

$$-\lambda_c(T) \frac{\partial T_c}{\partial \vec{n}_c} = \beta(T_c - T_s) \; - \; \lambda_s(T) \frac{\partial T_s}{\partial \vec{n}_s} \, , \tag{13}$$

$$C_{cs} = \beta(T_c - T_s) \, , \tag{14}$$

де

β – коефіцієнт контактного теплообміну між колоною і перекриттям, Вт/(м²·К);

$T_c - T_s$ – температури на межі з боку колони і плити відповідно, К.

У чисельному моделюванні теплопередачі у залізобетонному вузлі «колона–перекриття» доцільно приймати усереднене значення коефіцієнта контактного теплообміну β, що становить 375 Вт/м^2·К, відповідно до рекомендованого діапазону 250 –500 Вт/м^2·К, наведеного у [11, 12].

Врахування взаємного інфрачервоного випромінювання між колоною та перекриттям при пожежі.

Рисунок 2 ілюструє процес врахування взаємного інфрачервоного випромінювання між залізобетонною колоною та перекриттям у зоні вузла під час дії пожежі. На схемі представлено узагальнену модель теплопровідності, що включає комбінацію конвективного q_{conv} та радіаційного q_{rad} теплового впливу на відкриті поверхні елементів конструкції. Особлива увага зосереджена на деталізації області теплової взаємодії між внутрішніми поверхнями стику, де формується додатковий компонент – взаємне радіаційне випромінювання $q_{rad.m}$, що виникає внаслідок оптичного зв'язку між ділянками перекриття та колони.

У збільшеному фрагменті праворуч представлено параметри моделі: $\lambda(T)$, $c(T)$, $\rho(T)$ температурозалежні теплофізичні характеристики матеріалів; Ω_c, Ω_s – просторові області поверхонь, що беруть участь у взаємному опроміненні; F_0 – коефіцієнт взаємного бачення (view factor); r_0 – відстань між опроміненими ділянками. Схема моделює як основний потік теплоти від пожежі, так і додаткову локальну передачу енергії між внутрішніми поверхнями, яка суттєво впливає на формування температурних полів поблизу вузла. Такий підхід дозволяє більш точно описати теплові процеси поблизу вузлів, що дозволить визначити точніше час втрати несучої здатності.

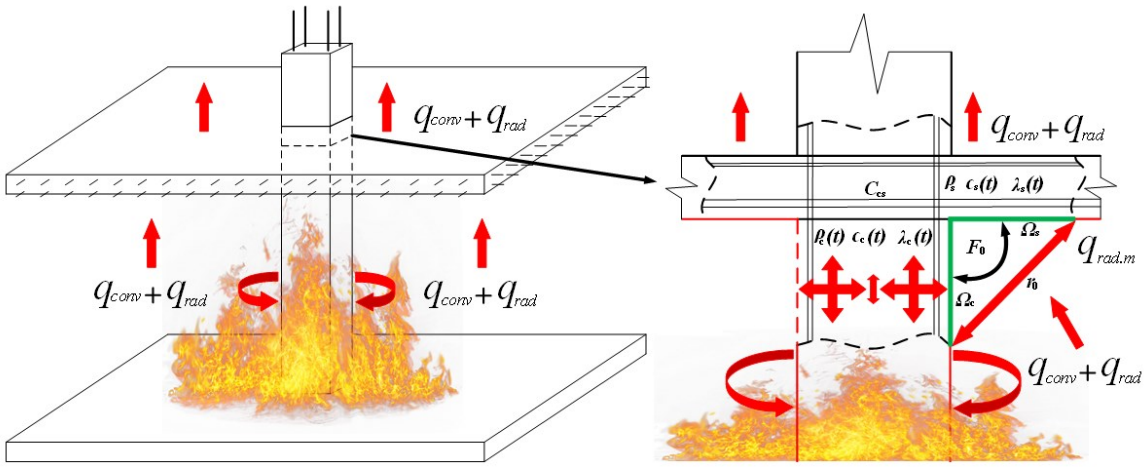


Рисунок 2 – Схематичне представлення моделі теплопереносу у вузлі «колона–перекриття» з урахуванням взаємного інфрачервоного випромінювання між внутрішніми поверхнями конструкцій при пожежі.

У загальному вигляді, теплове випромінювання між двома плоскими поверхнями A_1 і A_2 визначається рівнянням [13,14]:

$$q_{1-2} = \frac{\sigma\,(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{1-2}} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}}, \qquad (15)$$

де:

q_{1-2} – щільність теплового потоку від поверхні A_1, A_2, Вт/м²;

σ – 5,67 · 10^{-8} Вт/(м^2·К^4) – стала Стефана–Больцмана;

T_1, T_2, – абсолютні температури поверхонь A_1, A_2, відповідно, К;

ε_1, ε_2 – коефіцієнти випромінювальної здатності відповідних поверхонь;

F_{1-2} – коефіцієнт форми, частка випромінювання від A_1, що потрапляє на A_2;

A_1, A_2 – площі поверхонь, м^2.

Коли визначити точне значення F_{1-2} складно, застосовують наближену ефективну формулу для визначення взаємного інфрачервоного випромінювання між колоною та перекриттям при пожежі – $q_{rad.m}$:

$$q_{rad.m} = \varepsilon_{eff}\sigma\left(T_c^4 - T_s^4\right) \quad (16)$$

де:$\varepsilon_{eff} = \frac{1}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1}+\frac{1}{F_{1-2}}+\frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2}\frac{A_1}{A_2}}$, (17)

ε_{eff} – ефективний коефіцієнт випромінювання для поверхонь.

Формула дає нижчу теплову інтенсивність при збільшенні відстані між поверхнями або зменшенні площі поверхонь.

Важливе значення величини взаємного інфрачервоного випромінювання між колоною та перекриттям при пожежі відіграє взаємне розташування поверхонь. Оскільки в більшості випадків розташування поверхонь перпендикулярне, значення F_{1-2} вираховується за наступною формулою:

$$F_{1-2} = \frac{1}{A_1}\int\int_{A_1}\int\int_{A_2}\frac{cos\theta_1 cos\theta_2}{\pi S_{1-2}^2}dA_1 dA_2 \text{ , (18)}$$

F_{1-2} – коефіцієнт форми, частка теплового випромінювання, що виходить з поверхні A_1 і досягає поверхні A_2; безрозмірна величина (від 0 до 1);

θ_1 – кут між нормаллю до поверхні dA_1 та вектором напрямку до dA_2, рад;

θ_2 – кут між нормаллю до поверхні dA_2 та вектором напрямку до dA_1, рад;

S_{1-2} – відстань між точками dA_1 та dA_2, м;

dA_1, dA_2 – елементи площі поверхонь A_1 та A_2, м^2;

$cos\theta_1, cos\theta_2$ – косинуси кутів між нормалями до елементів площі і напрямом теплового випромінювання й враховують просторову орієнтацію поверхонь;

π – математична константа, що дорівнює приблизно – 3,14.

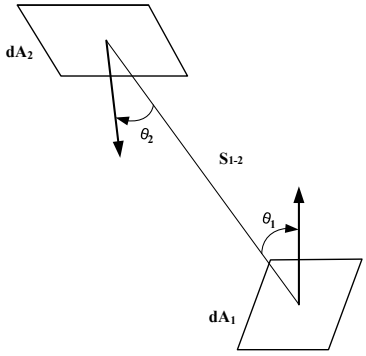


Рисунок 3 – Геометрична модель радіаційного теплообміну між двома диференціальними поверхнями dA_1 і dA_2 які використовуються у розрахунку коефіцієнта форми F_{1-2}

Рисунок 3 відображає просторову взаємодію між двома диференціальними елементами поверхні dA_1 та dA_2, які беруть участь у радіаційному теплообміні. Даний підхід застосовується при аналітичному та чисельному моделюванні радіаційного теплообміну між поверхнями конструкцій при пожежі. Поверхня dA_1 випромінює теплову енергію у напрямку поверхні dA_2, при цьому лінія, яка з'єднує ці два елементи, має довжину S_{1-2}. Кути θ_1 та θ_2 відповідають кутам між нормалями до відповідних поверхонь та напрямком лінії бачення S_{1-2}. Ця геометрія є базовою для виведення виразу для диференціального геометричного фактора (view factor), який визначає частку випромінювання, що передається від dA_1 до dA_2.

Для спрощено варіанту визначення взаємного радіаційного випромінювання $q_{rad.m}$ можна також застосовувати спрощену формулу:

$$q_{rad.m} = \sum_i \varepsilon_i \cdot \sigma \cdot (T_j^4 - T_i^4)\, F_{j\to i}\,, \quad (19)$$

де

$q_{rad.m}$ – потік теплового випромінювання, що надходить на поверхню *i* від поверхні *j* , Вт/м^2;

ε_i – коефіцієнт випромінювання поверхні і (для бетону ≈ 0.80);

σ – 5,67 · 10^{-8} Вт/(м^2·К^4) – стала Стефана–Больцмана;

T_i – температура поверхні і (на яку надходить випромінювання), К;

T_j – температура поверхні j (яка випромінює), К;

$F_{j\to i}$ – коефіцієнт взаємного бачення: скільки % випромінювання з *j* попадає на *i* (від 0 до 1).

Першою буде випромінювати тепло та нагрівати іншу конструкцію та, яка раніше прогріється до вищої температури. Тобто – конструкція з меншою тепловою інерцією, меншою масивністю або більш інтенсивним навантаженням від пожежі.

У випадку дії пожежі на конструкції які будуть складатися із колони та перекриття, першою випромінює тепло – колона, оскільки як приклад вона прогрівається швидше (з усіх сторін), має меншу загальну масу на 1 м^2 обігріваємої поверхні (менша товщина), раніше досягає вищої температури, і як результат – інтенсивно випромінює інфрачервоне тепло до перекриття.

Загальний вигляд граничної умови на плиті на нижній поверхні плити яка обігрівається знизу гарячими газами пожежі, одночасно отримує теплове випромінювання від нагрітих бічних поверхонь колони, сумарний тепловий потік буде мати вигляд.

Граничні умови на зовнішній поверхні залізобетонної плити, яка піддається вогневому впливу та додатково опромінення бічними сторонами колони буде мати наступний вигляд:

$$-\lambda(T)\cdot\frac{\partial T}{\partial \vec{n}} = q_{conv} + q_{rad} + q_{rad.m} \quad (20)$$

або

$$-\lambda(T)\cdot\frac{\partial T}{\partial \vec{n}} = \alpha\cdot\left(T_g(t) - T\right) + \varepsilon\cdot\sigma\cdot\left(T_g(t)^4 - T^4\right) + \sum_i \varepsilon_i\cdot\sigma\cdot\left(T_j^4 - T_i^4\right)\cdot F_{j\to i}, \quad (21)$$

де

$\lambda(T)$ – коефіцієнти теплопровідності матеріалу, Вт/м · К;

$\frac{\partial T}{\partial \vec{n}}$ – температурний градієнт у напрямку нормалі до поверхні;

α – коефіцієнт конвективного теплообміну (Вт/м²·К);

$T_g(t)$ – температура газового середовища в момент часу, К;

ε – коефіцієнт випромінювання поверхні відповідної поверхні;

σ – 5,67 · 10^{-8} Вт/(м^2·К^4) – стала Стефана–Больцмана;

T – температура поверхні, К;

T_i – температура поверхні і (на яку надходить випромінювання), К;

T_j – температура поверхні j (яка випромінює), К;

$F_{j\to i}$ – коефіцієнт взаємного бачення: скільки % випромінювання з *j* попадає на *i* (від 0 до 1).

Для розрахунку інтенсивності теплового потоку, що надходить від нагрітих поверхонь залізобетонної колони до нижньої поверхні плити перекриття в умовах пожежі, залежно від відстані, використовується наступне співвідношення:

$$q_{rad.m}(r,t) = \varepsilon\cdot\sigma\cdot\left[T_c^4(t) - T_s^4(t)\right]\cdot\frac{F_0}{r^2}, \quad (22)$$

де

$q_{rad.m}(r,t)$ – щільність теплового потоку, Вт/м², що надходить на елемент перекриття на відстані *r* від колони у момент часу *t*;

ε – коефіцієнт випромінювання поверхні (для бетону ≈ 0.80);

σ – 5,67 · 10^{-8} Вт/(м^2·К^4) – стала Стефана–Больцмана;

$T_c(t)$ – температура поверхні колони, К, що змінюється з часом відповідно до стандартної пожежі;

$T_s(t)$ – температура поверхні перекриття, К;

F_0 – коефіцієнт взаємного бачення (від 0 до 1);

r – відстань між випромінюючою поверхнею колони та елементом перекриття, що приймає тепло, м.

Для оцінки щільності теплового потоку, що надходить від нагрітих бокових поверхонь колони до перекриття внаслідок інфрачервоного випромінювання, критично важливо враховувати коефіцієнт взаємного бачення F_0, який залежить від геометрії та просторового розташування елементів.

$$F_0 = \frac{1}{2\pi}\left[sin^{-1}\left(\frac{ab}{\sqrt{\alpha^2+b^2+H^2}}\right) + \frac{abH}{(\alpha^2+H^2)\sqrt{b^2+H^2}} + \frac{abH}{(b^2+H^2)\sqrt{\alpha^2+H^2}}\right], \quad (23)$$

де

F_0 – коефіцієнт взаємного бачення (від 0 до 1);

a — напівширина вертикальної поверхні, м;

b — напівширина горизонтальної поверхні, м;

H — відстань між ними, м

Основні механізми теплопередачі, що виникають у зоні з'єднання «залізобетонна колона–перекриття» під час пожежі представлені у таблиці 1. Таблиця відображає характер кожного процесу, умови його реалізації, напрям теплового потоку та поведінку при температурному вирівнюванні.

Таблиця 1 – Механізм теплообміну на поверхнях колони та перекриття

№ з/п	Механізм	Формула моделі	Напрямок потоку	Діє, коли	Що відбувається при вирівнюванні температур
1.	Конвекція від газів	$\alpha \cdot (T_g(t) - T)$	від нагрітих газів до поверхні	$T_g > T$	Потік зникає коли $T_g > T$
2.	Випромінювання	$\varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_g^4 - T^4)$	від газів до поверхні	$T_g > T$	Потік зникає коли $T_g > T$
3.	Власне випромінювання з поверхні колони	$\varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_i^4) \cdot F_{j\to i}$	від колони до плити	$T > T_i$	Потік зникає коли $T > T_i$
4.	Випромінювання від плити на колону (зворотне)	$\varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_i^4 - T^4) \cdot F_{i\to j}$	від плити до колони	$T_i > T$	Потік зникає коли $T > T_i$
5.	Теплопровідність	$-\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial \vec{n}}$	всередину елемента	залежить від матеріалу	Температурний профіль усередині вирівнюється

Для врахуванням $q_{rad.m}(r,t)$, що виникає між боковою поверхнею залізобетонної колони та нижньою гранню плити перекриття в умовах стандартної пожежі, необхідно слід приймати розрахункові ділянки:

– по площі перекриття (горизонтально), рекомендований радіус урахування r 0 ≤ 0,5 м;

– по висоті колони (вертикально), рекомендована висота урахування r 0 ≤ 0,5 м.

У межах до 0,5 м від бокової поверхні колони щільність теплового потоку від інфрачервоного випромінювання змінюється нерівномірно, зменшуючись та визначаючись за формулою (22).

У результаті на відстані 0,1–0,2 м від колони додаткове теплове навантаження може становити до 30–35 % від загального потоку пожежі, на відстані 0,3–0,5 м – знижується до 10–15 %. Цей вплив є локально значущим і може

викликати в цих зонах прискорене досягнення критичних температур арматури, зменшення граничного часу вогнестійкості перекриття на 5–15 хв, формування локальних зон пошкодження.

Висновки та напрями подальших досліджень. У результаті проведеного дослідження було побудовано удосконалену математичну модель теплопередачі в системі «залізобетонна колона–перекриття» з урахуванням складних теплофізичних процесів, що виникають під час пожежі. На відміну від спрощених ізольованих моделей, запропонована модель відображає сумісну роботу конструктивних елементів та взаємний тепловий вплив у межах єдиної розрахункової області. Важливість полягає у врахуванні одночасно кількох механізмів теплопередачі:

– конвективний обмін між гарячими газами та поверхнею конструкції;

– випромінювання від пожежі;

– врахування локального теплообміну в зоні контакту;

– взаємне теплове випромінювання між окремими елементами конструкції, зокрема від нагрітої колони на плиту перекриття.

Такий підхід дозволяє значно підвищити точність прогнозування температурних полів у зонах стику несучих елементів, де відбувається концентрація термічного навантаження. У свою чергу, це забезпечує достовірну оцінку зниження несучої здатності, деформаційних характеристик та потенціалу прогресуючого обвалення в умовах пожежі.

Запропонована модель можлива для чисельної реалізації методом скінченних елементів у програмі ЛІРА-САПР, ANSYS при моделюванні розподілу температурних полів залізобетонних конструкцій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Lie, T. (1992). *Structural fire protection*. ASCE.
2. Schneider, U., Harada, T. (2005). Behavior of concrete at high temperatures. *Fire Safety Journal*, 40(8), 638–645.
3. Kodur, V., Dwaikat, M. (2007). A numerical model for predicting the fire resistance of reinforced concrete beams. *Journal of Fire Protection Engineering*, 17(4), 293–320.
4. Kodur, V., Dwaikat, M. (2015). Modeling the response of reinforced concrete slabs to fire exposure. *Computers and Concrete*, 15(3), 375–390.
5. CEN (2004). *EN 1992-1-2: Eurocode 2. Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design*.
6. CEN (2002). *EN 1991-1-2: Eurocode 1. Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire*.
7. Usmani, A., Rotter, J., Lamont, S., Sanad, A., Gillie, M. (2001). Fundamental principles of structural behavior under thermal effects. *Fire Safety Journal*, 36(8), 721–744.
8. Лобко І. О. Гудименко О. М. (2018). Аналіз температурних полів у вузлах монолітних будівель під час пожежі. *Науково-технічний вісник будівництва,* 101(1), 48–54.
9. Klote., R. (2000). Heat transfer and fire modeling, NIST, 2000.
10. Mendez., A. (2020). Analysis of heat transfer mechanisms in hollow concrete masonry units under fire conditions. *Journal of Building Physics*.
11. SFPE. (2016). Handbook of Fire Protection Engineering. 5th ed. – Springer, 3496.
12. Park, J., Kim, S., Lee, J. (2020). Thermal Contact Conductance-Based Thermal Behavior Analytical Model for Hybrid Floors at Elevated Temperatures. Materials, 13(21), 4869.
13. Modest, M.F. (2013). Radiative Heat Transfer. 3rd ed. Academic Press.
14. Siegel, R., Howell, J. (2002). Thermal Radiation Heat Transfer. 4th ed. Taylor, Francis.

REFERENCES

1. Lie, T. (1992). *Structural fire protection*. ASCE.
2. Schneider, U., Harada, T. (2005). Behavior of concrete at high temperatures. *Fire Safety Journal*, 40(8), 638–645.
3. Kodur, V., Dwaikat, M. (2007). A numerical model for predicting the fire resistance of reinforced concrete beams. *Journal of Fire Protection Engineering*, 17(4), 293–320.
4. Kodur, V., Dwaikat, M. (2015). Modeling the response of reinforced concrete slabs to fire exposure. *Computers and Concrete*, 15(3), 375–390.
5. CEN (2004). *EN 1992-1-2: Eurocode 2. Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design*.
6. CEN (2002). *EN 1991-1-2: Eurocode 1. Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire*.
7. Usmani, A., Rotter, J., Lamont, S., Sanad, A., Gillie, M. (2001). Fundamental principles of structural behavior under thermal effects. *Fire Safety Journal*, 36(8), 721–744.
8. Lobko I. O. Hudymenko O. M. (2018). Analiz temperaturnykh poliv u vuzlakh monolitnykh budivel pid chas pozhezhi. *Naukovo-tekhnichnyi visnyk budivnytstva*, 101(1), 48–54.
9. Klote., R. (2000). Heat transfer and fire modeling, NIST, 2000.

10. Mendez., A. (2020). Analysis of heat transfer mechanisms in hollow concrete masonry units under fire conditions. *Journal of Building Physics*.
11. SFPE. (2016). Handbook of Fire Protection Engineering. 5th ed. – Springer, 3496.
12. Park, J., Kim, S., Lee, J. (2020). Thermal Contact Conductance-Based Thermal Behavior Analytical Model for Hybrid Floors at Elevated Temperatures. Materials, 13(21), 4869.
13. Modest, M.F. (2013). Radiative Heat Transfer. 3rd ed. Academic Press.
14. Siegel, R., Howell, J. (2002). Thermal Radiation Heat Transfer. 4th ed. Taylor, Francis.

IMPROVEMENT OF THE MATHEMATICAL MODEL OF HEAT TRANSFER OF THE "REINFORCED CONCRETE COLUMN-FLOOR" SYSTEM

R. Maiboroda, Yu. Otrosh

National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine

KEYWORDS:

thermal conductivity, fire, reinforced concrete, connection point, contact thermal conductivity, progressive collapse.
.

ABSTRACT

The article presents an improved mathematical model of thermal conductivity in the «reinforced concrete column–floor» system during a fire, which takes into account the spatial thermal interaction of structural elements, thermal contact in the joint zone, and the mechanism of mutual irradiation. The model is a significant extension of the classical approach, in which structures are considered mainly as passive objects of heat absorption. The proposed approach takes into account that heated surfaces are additional sources of radiation, which contributes to an increase in the temperature of structures in the near joint zone, and are also simultaneously cooled due to heat losses due to mutual irradiation. The calculation of mutual irradiation between surfaces in the model is implemented taking into account the coefficient of vision and distances between surfaces. A description of thermal contact is presented through the coefficient of contact heat transfer, which takes into account the nature of adhesion and the density of the monolithic joint. As a result, the model allows to accurately reflect the temperature distribution at the junction of structures, including additional local heating due to mutual irradiation. The results of numerical analysis showed that in the zone up to 0.5 m from the junction, additional column radiation can increase the temperature of the floor by 20–40°C compared to models without taking this interaction into account, which reduces the fire resistance of the slab by 5–10%. Taking this effect into account is especially important in calculations of resistance to progressive collapse of buildings due to fire, since exceeding critical temperatures in the zone of connection of structures significantly increases the probability of initiating sequential collapse of load-bearing elements. Thus, the improved model provides a comprehensive numerical representation of temperature fields under fire conditions, taking into account constructive interaction, thermal contact, mutual irradiation and the impact on the probability of progressive collapse in monolithic reinforced concrete buildings. Practical implementation is possible in numerous software environments, such as LIRA-SAPR.

УДК 614.841.3

МОДЕЛЬ НАГРІВУ РЕЗЕРВУАРА З НАФТОПРОДУКТОМ ПІД ТЕПЛОВИМ ВПЛИВОМ ПОЖЕЖІ В СУСІДНЬОМУ РЕЗЕРВУАРІ

https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.1.(19).109-119

Басманов О. Є.[1] ORCID iD 0000-0002-6434-6575
Карпова Д. І.[2], ORCID iD 0000-0002-1692-3630
Гарбуз С. В. [2], ORCID iD 0000-0001-6345-6214
Володченко М. А.[1], ORCID iD 0009-0007-8551-755X
*E-mail: basmanov@ukr.net

[1]*Інститут наукових досліджень з цивільного захисту НУЦЗ України, Україна*
[2]*Національний університет цивільного захисту України, Україна*

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 30.04.2025
Пройшла рецензування: 12.05.2025

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

пожежа в резервуарі, рівняння теплового балансу, тепловий потік випромінюванням, конвекція

АНОТАЦІЯ

Об’єктом дослідження є теплові процеси, що мають місце в вертикальному сталевому резервуарі з нафтопродуктом в умовах теплового впливу пожежі в сусідньому резервуарі. Побудовано рівняння теплового балансу для стінки і покрівлі резервуара, які являють собою двовимірні рівняння теплопровідності, в яких враховано променевий і конвекційний теплообмін з пожежею, навколишнім середовищем, рідиною в резервуарі і пароповітряною сумішшю в його газовому просторі. Такий підхід є можливим внаслідок значно меншої товщини стінок резервуара порівняно з його лінійними розмірами. Розраховано коефіцієнти взаємного опромінення різних частин резервуара з полум’ям та між собою, що дозволило визначити променеві складові теплових потоків. Для визначення конвекційних складових було використано методи теорії подібності для побудови оцінок коефіцієнтів конвекційного теплообміну. Застосування методу скінчених різниць для чисельного розв’язання системи диференціальних рівнянь з відповідними крайовими і початковими умовами дозволяє визначити розподіл температури по стінці і покрівлі резервуара в довільний момент часу. Показано, що найбільшій небезпеці піддається верхній край стінки резервуара, обернений в бік пожежі. Це пов’язано як з більшим значенням коефіцієнта взаємного опромінення з полум’ям, так і з відсутністю контакту з рідиною в резервуарі. Зокрема, у випадку пожежі в одному з резервуарів резервуарної групи з чотирьох резервуарів РВС-10000 з дизельним пальним верхній край сусіднього резервуара, розташованого з підвітряного боку, досягає температури самоспалахування парів дизельного пального вже через 10 хв. після початку пожежі. При цьому температура стінки резервуара нижче рівня нафтопродукту не перевищує 70 ºС. Температура покрівлі резервуара за цей час також не досягає критичного значення, складаючи близько 200 ºС. Побудована модель може бути використана для визначення частин стінки і покрівлі резервуара, які підлягають охолодженню, а також визначення граничного часу початку подачі води на охолодження.

Постановка проблеми. Склади зберігання нафтопродуктів відіграють ключову роль у забезпеченні безперервного функціонування систем транспортування та переробки палива. В умовах повномасштабної збройної агресії російської федерації такі об’єкти перетворилися на пріоритетні цілі атак з використанням артилерійських систем, ракет та безпілотних літальних апаратів. Руйнування резервуарів нафтобаз супроводжуються масштабними

пожежами, які мають серйозні наслідки не лише для самої інфраструктури, але й для навколишнього середовища, населення та рятувальних служб.

На відміну від аварій, що відбуваються в мирний час внаслідок технічних несправностей або людського фактора, бойові дії часто спричиняють одночасне загоряння кількох резервуарів. У таких випадках значно зростає інтенсивність теплового випромінювання, яке може бути спрямоване на сусідні об'єкти, включно з іншими резервуарами, що суттєво ускладнює процес локалізації пожежі та підвищує ризики для особового складу. При цьому існуючі рекомендації з гасіння пожеж [1] у резервуарних парках зазвичай ґрунтуються на випадку пожежі в одному резервуарі, що є недостатнім при сучасних умовах ведення бойових дій.

Зокрема в березні 2022 року російські війська завдали ракетного удару по нафтобазі на околиці Луцька. Ракета влучила в резервуар з пальним, спричинивши масштабну пожежу, яка тривала понад 32 години і охопила значну частину об'єкта, що призвело до повного вигорання нафтобази [2].

Таким чином, актуальною проблемою є розповсюдження пожежі на сусідні резервуари внаслідок теплового впливу до них.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Ризик-орієнтований підхід для розподілу ресурсів та заходів, спрямованих на зниження ймовірності виникнення небезпек, таких як вибухи або великомасштабні пожежі, представлений в [3]. Але такий підхід не дає відповіді на питання щодо можливих сценаріїв розвитку пожежі в конкретних умовах. В [4] було досліджено втрату маси і час злиття полум’я в сусідніх резервуарах. Але тепловий вплив на сусідні резервуари залишено поза увагою. В [5] експериментально досліджено горіння легкозаймистої рідини, що безперервно витікає зі сталою об’ємною швидкістю. Визначено питому масову швидкість вигорання і товщину шару рідини. Але тепловий вплив на сусідні об’єкти залишено поза увагою. В [6] експериментально досліджено форму полум’я, його висоту і ширину, а також максимальне значення щільності теплового потоку випромінюванням. Але нагрів сусідніх об’єктів під тепловим впливом пожежі не розглядається. В [7] побудовано модель теплового випромінювання від пожежі нафтопродукту в резервуарі, що враховує неоднорідність теплового випромінювання по поверхні полум’я внаслідок наявності диму. Однак наведена модель не дає змогу визначити наслідки теплового впливу пожежі на покрівлю сусіднього резервуара. В [8] експериментально досліджено теплове випромінювання від пожежі в прямокутних басейнах з гептаном. Але малі розміри лабораторної установки (ширина басейну 8 см) не дозволяє застосувати отримані результати до реальних пожеж. В [9] розглянуто методологію для оптимізації евакуації на промислових об'єктах у разі масштабної пожежі резервуарів. Але наслідки теплового впливу пожежі на сусідні резервуари і пов’язані із цим небезпеки залишено поза увагою. В [10] експериментально досліджено вплив вітру на питому масову швидкість вигорання рідини в модельних резервуарах діаметром 5 см і 10 см. В [11] експериментально досліджено висоту полум’я і питому масові швидкість вигорання гептану та етанолу в умовах вітру. Але і тут лабораторний характер досліджень (розмір пальника – десятки сантиметрів) ускладнює застосування отриманих результатів у випадку реальних пожеж. В [12] за допомогою симулятора динаміки пожежі (FDS) досліджено вплив пожежі в резервуарі або в басейні на сусідній резервуар. Показано, що можливі ситуації, в яких виникає «ефект доміно» – розповсюдження пожежі на сусідні резервуари. В [13] FDS використано для дослідження променевих і конвекційних теплових потоків при пожежі сирої нафти в резервуарі з плаваючою покрівлею ємністю 118 тис. м^3. В [14] досліджено пожежі нафтопродуктів в обвалуванні

резервуарів. Зроблено висновок про небезпеку не лише для резервуара, в обвалуванні якого відбувається горіння, але й для сусідніх резервуарів. В [15] побудовано математичну модель для швидкого виявлення витоку легкозаймистої рідини з резервуара. Але сценарії розвитку подій після її загоряння не розглядаються. В [16] побудовано модель нагріву частини стінки резервуара, що розташована вище рівня нафтопродукту, під тепловим впливом пожежі в сусідньому резервуарі. Враховано променевий і конвекційний теплообмін, але поза увагою залишено теплопровідність вздовж стінки резервуара.

Таким чином, невирішеною частиною проблеми розповсюдження пожежі на сусідні резервуари внаслідок теплового потоку на них є визначення наслідків теплового впливу пожежі на сусідній резервуар з нафтопродуктом.

Формулювання цілей дослідження. Метою роботи є визначення розподілу температури по стінці і покрівлі вертикального сталевого резервуара з нафтопродуктом внаслідок теплового впливу пожежі в сусідньому резервуарі. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

– побудувати рівняння теплового балансу для стінки і покрівлі резервуара;
– визначити теплові потоки до стінки і покрівлі резервуара;
– розв’язати рівняння теплового балансу із застосуванням чисельних методів.

Методи дослідження. Об’єктом дослідження є теплові процеси в вертикальному сталевому резервуарі (РВС) з нафтопродуктом, що нагрівається під впливом пожежі в аналогічному сусідньому резервуарі. Для опису розподілу температури по сталевій оболонці резервуара застосовано двовимірне рівняння теплопровідності. Для визначення щільності теплового потоку випромінюванням використано закон Стефана–Больцмана. Визначення конвекційної складової теплообміну проведено із застосуванням методів теорії подібності. Для проведення чисельних розрахунків використано метод скінчених різниць. Програмну реалізацію метода виконано в середовищі програмування Delphi 12.

Виклад основного матеріалу дослідження. В загальному випадку розподіл температури по оболонці вертикального сталевого резервуара в циліндричній системі координат описується тривимірним рівнянням теплопровідності

$$\frac{\partial T}{\partial t}=a_s\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)+\frac{q_v}{c_s\rho_s};\ r_1(z)<r<r_2(z);\ 0\le\varphi<2\pi;\ 0<z<H_1,\quad (1)$$

де $T(r,\varphi,z,t)$ – значення температури в точці (r,φ,z) оболонки резервуара в момент часу t; a_s, c_s, ρ_s – коефіцієнт температуропровідності, питома теплоємність і густина сталі відповідно; q_v – щільність об’ємних джерел тепла; початок координат розташовано в центрі основи резервуара, що нагрівається, а вісь z співпадає з віссю резервуара (рис. 1); H_1 – загальна висота резервуара:

$$H_1=H+H_r=H+R\,\mathrm{tg}\beta;$$

H, R – висота стінки і радіус резервуара; H_r – висота конічної покрівлі резервуара; β – кут між покрівлею і горизонтальною поверхнею (рис. 1).

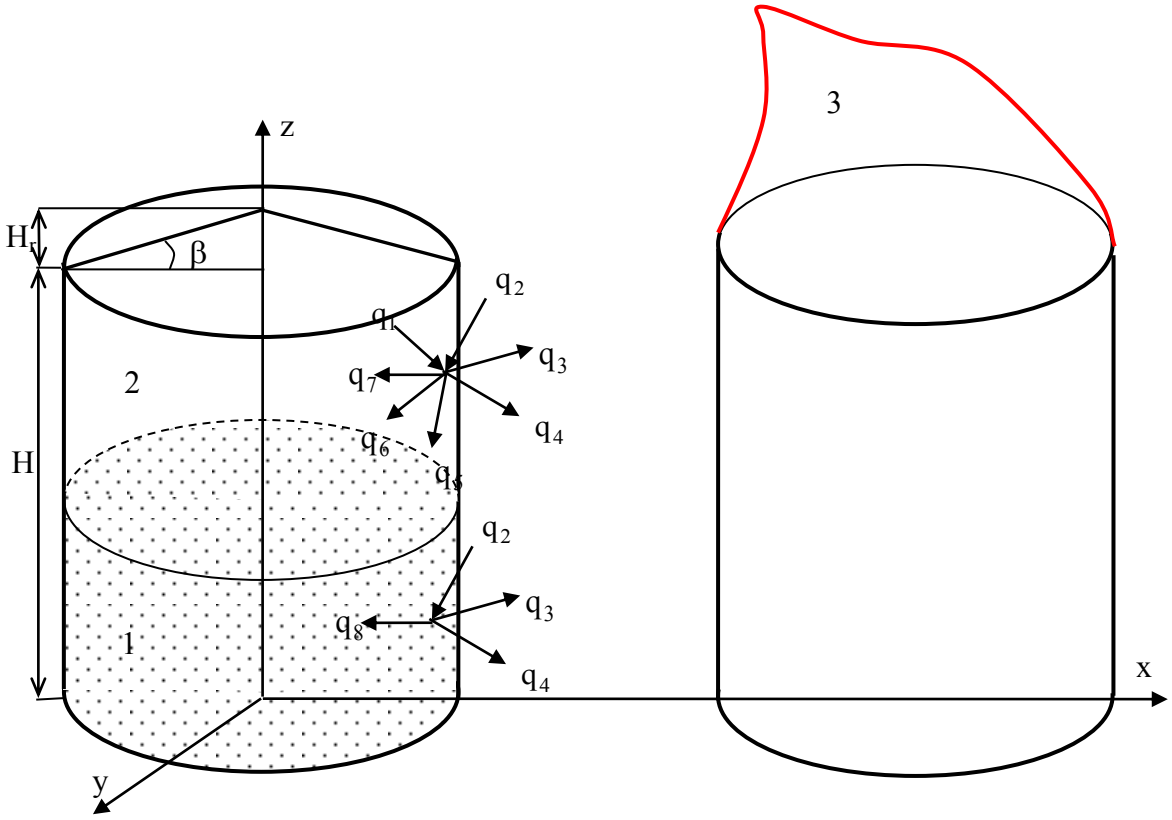


Рисунок 1 – Тепловий вплив пожежі в вертикальному сталевому резервуарі з нафтопродуктом на аналогічний сусідній резервуар: 1 – нафтопродукт в резервуарі, що нагрівається; 2 – газовий простір резервуара; 3 – полум'я над резервуаром

Діаметр резервуарів РВС-1000 – РВС-20000 складає від 10 до 40 м, висота – від 12 до 18 м, а товщина стінки не більше 8 мм. Перевищення лінійних розмірів оболонки резервуара над її товщиною на три порядки дозволяє вважати розподіл температури по товщині стінки та покрівлі рівномірним:

$$\frac{\partial T}{\partial \vec{\ell}} = 0, \tag{2}$$

де $\vec{\ell}$ – вектор, перпендикулярний до поверхні оболонки резервуара. Для стінки резервуара умова (2) означає, що $\partial T/\partial r=0$. Внаслідок цього рівняння (1) набуло вигляду

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = a_s\left(\frac{1}{R^2}\frac{\partial^2 T_1}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2}\right) + \frac{q}{\delta_s c_s \rho_s};\ 0 \le \varphi < 2\pi;\ 0 < z < H, \tag{3}$$

де $T_1(\varphi,z,t)$ – температура стінки у точці (φ,z) в момент часу t; δ_s – товщина стінки; q – щільність теплового потоку на стінку резервуара. Для покрівлі резервуара має місце

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = a_s\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T_2}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 T_2}{\partial \varphi^2} + tg^2\beta\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2}\right) + \frac{q}{\delta_s c_s \rho_s};\ 0 < r < R;\ 0 \le \varphi < 2\pi, \tag{4}$$

де $T_2(r,\varphi,t)$ – температура покрівлі резервуара у точці з координатами (r,φ) в момент часу t. На межі контакту стінки і покрівлі резервуара має місце рівність

$$T_1(\varphi, H, t) = T_2(R, \varphi, t);\ 0 \le \varphi < 2\pi. \quad (5)$$

Припущення про теплоізольованість нижньої межі стінки резервуара дало граничну умову у вигляді

$$\left.\frac{\partial T}{\partial z}\right|_{z=0} = 0. \quad (6)$$

Диференціальні рівняння (3) і (4) разом з крайовими умовами (5), (6), а також початковою умовою

$$T_1(\varphi, z, 0) = T_2(r, \varphi, 0) = T_0 \quad (7)$$

описують розподіл температури по стінці і покрівлі резервуара в довільний момент часу; T_0 – температура резервуара до початку пожежі.

Щільність теплового потоку q у точці на поверхні резервуара залежить від її розташування – вище рівня рідини або нижче. Для точки на покрівлі резервуара або на стінці резервуара вище рівня нафтопродукту має місце рівність

$$q = \sum_{i=1}^{7} q_i,$$

де q_i – щільності теплового потоку:

q_1 – випромінюванням від внутрішньої поверхні покрівлі резервуара;

q_2 – випромінюванням від полум'я;

q_3 – випромінюванням від навколишнього середовища;

q_4 – конвекційним теплообміном з навколишнім повітрям;

q_5 – випромінюванням від поверхні рідини в резервуарі;

q_6 – конвекційним теплообміном з пароповітряною сумішшю в газовому просторі резервуара;

q_7 – випромінюванням від внутрішньої поверхні стінки резервуара.

Для точки на стінці резервуара нижче рівня нафтопродукту:

$$q = q_2 + q_3 + q_4 + q_8,$$

де q_8 – щільність теплового потоку внаслідок конвекційного теплообміну з рідиною в резервуарі. Щільність теплового потоку випромінюванням від покрівлі резервуара визначаються законом Стефана–Больцмана:

$$q_1 = \frac{c_0 \varepsilon_s^2}{\pi} \iint_{S_2} \left(\left(\frac{T_2}{100}\right)^4 - \left(\frac{T}{100}\right)^4 \right) \frac{\cos\varphi_1 \cos\varphi_2}{r_{12}^2} dS_2, \quad (8)$$

де $c_0 = 5{,}67$ Вт/(м^2·К^4) – стала; ε_s – ступінь чорноти поверхні резервуара; S_2 – внутрішня поверхня покрівлі резервуара; T – температура в даній точці A_1 на стінці або покрівлі резервуара; r_{12} – довжина радіус-вектора, що з'єднує точку A_1 з довільною точкою A_2 на поверхні S_2; φ_1 – кут між вектором $\overrightarrow{A_1A_2}$ і нормальним вектором $\vec{n}_1$ до поверхні в

точці A_1; φ_2 – кут між вектором $\overrightarrow{A_2A_1}$ і нормальним вектором $\vec{n}_2$ до поверхні в точці A_2. Поверхня S_2 може бути представлена в параметричному вигляді

$$\begin{cases} x = u\cos v; \\ y = u\sin v; \qquad 0 \le u \le R;\ 0 \le v \le 2\pi. \\ z = H_1 - u\cdot tg\beta; \end{cases} \tag{9}$$

Одиничний нормальний вектор до поверхні S_2 у точці (x, y, z) має вигляд

$$\vec{n}_2 = \left(\frac{A}{\sqrt{A^2+B^2+C^2}}, \frac{B}{\sqrt{A^2+B^2+C^2}}, \frac{C}{\sqrt{A^2+B^2+C^2}} \right); \tag{10}$$

$$A = \frac{\partial y}{\partial u}\frac{\partial z}{\partial v} - \frac{\partial z}{\partial u}\frac{\partial y}{\partial v};\ B = \frac{\partial z}{\partial u}\frac{\partial x}{\partial v} - \frac{\partial x}{\partial u}\frac{\partial z}{\partial v};\ C = \frac{\partial x}{\partial u}\frac{\partial y}{\partial v} - \frac{\partial y}{\partial u}\frac{\partial x}{\partial v}. \tag{11}$$

Підстановка (9) в (11) дала

$$A = -u\cdot tg\beta\cos v;\ B = -u\cdot tg\beta\sin v;\ C = -u. \tag{12}$$

Для точки A_1 на внутрішній поверхні стінки з координатами (φ_0,z) одиничний нормальний вектор дорівнює

$$\vec{n}_1 = \left(-\cos\varphi_0, -\sin\varphi_0, 0\right). \tag{13}$$

Об'єднання виразів (8), (9), (12), (13) дало щільність теплового потоку випромінюванням від покрівлі до даної точки на стінці резервуара

$$q_1 = \frac{c_0\varepsilon_s^2}{\pi}\int_0^{2\pi} dv \int_0^R du \left(\left(\frac{T_2}{100}\right)^4 - \left(\frac{T}{100}\right)^4 \right) \times$$
$$\times \frac{\left[r - u\cos(v-\varphi_0)\right]\left[H_1 - z - r\cos(v-\varphi_0)\right]u}{\left[(u\cos v - r\cos\varphi_0)^2 + (u\sin v - r\sin\varphi_0)^2 + (H_1 - u\cdot tg\beta - z)^2\right]^2}. \tag{14}$$

Для точки A_1 на внутрішній поверхні покрівлі з координатами (r,φ_0) одиничний нормальний вектор дорівнює

$$\vec{n}_1 = \left(-\sin\beta\cos\varphi_0, -\sin\beta\sin\varphi_0, \cos\beta\right). \tag{15}$$

Об'єднання виразів (8), (9), (12), (15) дало щільність теплового потоку від покрівлі до даної точки на покрівлі резервуара

$$q_1 = \frac{c_0\varepsilon_s^2}{\pi}\int_0^{2\pi} dv \int_0^R du \left(\left(\frac{T_2}{100}\right)^4 - \left(\frac{T}{100}\right)^4 \right) \times$$
$$\times \frac{u^2 r(1-\cos(v-\varphi_0))^2 tg\beta\sin\beta}{\left[(u\cos v - r\cos\varphi_0)^2 + (u\sin v - r\sin\varphi_0)^2 + (H_1 - u\cdot tg\beta - z)^2\right]^2}.$$

Щільність теплового потоку випромінюванням від полум'я до точки на зовнішній поверхні стінки резервуара визначається законом Стефана–Больцмана

$$q_2 = c_0 \varepsilon_f \varepsilon_s \left(\left(\frac{T_f}{100} \right)^4 - \left(\frac{T}{100} \right)^4 \right) \psi_2 ,$$

де T_f, ε_s – температура та ступінь чорноти випромінюючої поверхні полум'я відповідно; ψ_2 – коефіцієнт взаємного опромінення з факелом:

$$\psi_2 = \frac{1}{\pi} \iint_{S_f} \frac{\cos\varphi_1 \cos\varphi_2}{r_{12}^2} dS_f ; \qquad (16)$$

S_f – поверхня факела; інтеграл (16) обчислюється лише по тих точках поверхні S_f, в яких косинуси кутів φ_1, φ_2 є додатними.

Щільність теплового потоку випромінюванням від навколишнього середовища до зовнішньої поверхні стінки резервуара описується виразом

$$q_3 = c_0 \varepsilon_s \left(\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{T}{100} \right)^4 \right) (1 - \psi_2), \qquad (17)$$

де T_0 – температура навколишнього середовища.

Щільність теплового потоку внаслідок конвекційного теплообміну з навколишнім повітрям визначається законом Ньютона

$$q_4 = \alpha_4 (T_0 - T), \qquad (18)$$

де коефіцієнт конвекційного теплообміну α_4 залежить від режиму конвекції – вимушеної (при наявності вітру) або вільною (при незначному або повністю відсутньому вітрі). Конвекційний теплообмін внутрішньої поверхні стінки з пароповітряною сумішшю в газовому просторі резервуара також буде описуватися виразом, аналогічним (18)

$$q_6 = \alpha_6 (T_{int} - T), \qquad (19)$$

де α_6 – коефіцієнт конвекційного теплообміну з пароповітряною сумішшю.

Щільність теплового потоку випромінюванням від внутрішньої поверхні стінки або покрівлі до поверхні рідини в резервуарі визначається законом Стефана–Больцмана

$$q_5 = c_0 \varepsilon_s \varepsilon_\ell \left(\left(\frac{T_\ell}{100} \right)^4 - \left(\frac{T}{100} \right)^4 \right) \psi_5 , \qquad (20)$$

де ψ_5 – коефіцієнт взаємного опромінення, який для точки на стінці резервуара буде мати вигляд

$$\psi_5 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} dv \int_0^1 ds \, \frac{z_R s (1 - s \cdot \cos v)}{\left[(1 - s \cdot \cos v)^2 + s^2 \sin^2 v + z_R^2 \right]^2} ,$$

де $z_R=z/R$; z – відстань до поверхні рідини. Для точки на внутрішній поверхні покрівлі резервуара коефіцієнт взаємного опромінення набув вигляду

$$\psi_5=\frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi}dv\int_0^{R}udu\frac{(H_1-r_0tg\beta-h)[(H_1-h)\cos\beta-u\cos v\sin\beta]}{\left[r_0^2+u^2-2r_0u\cos v+(H_1-r_0tg\beta-h)^2\right]^2}.$$

Щільність теплового потоку випромінюванням від внутрішньої поверхні стінки резервуара до заданої точки A_1 на стінці або покрівлі резервуара визначається законом Стефана–Больцмана. З урахуванням неоднорідного розподілу температури по стінці резервуара для точки $A_1(\varphi_0, z_0)$ щільність теплового потоку має вигляд

$$q_7=\frac{R^3c_0\varepsilon_s^2}{\pi}\int_0^{2\pi}dv\int_h^{H}dz\frac{(1-\cos(v-\varphi_0))^2}{\left[2R^2(1-\cos(v-\varphi_0))+(z-z_0)^2\right]^2}\left(\left(\frac{T}{100}\right)^4-\left(\frac{T_1}{100}\right)^4\right).$$

Для точки $A_1(r_0, \varphi_0)$ на внутрішній поверхні покрівлі резервуара і точки $A_2(u, v)$ на стінці резервуара щільність теплового потоку від стінок для точки A_1 набуде вигляду

$$q_7=\frac{Rc_0\varepsilon_s}{\pi}\int_0^{2\pi}dv\int_h^{H}\left(\left(\frac{T_1}{100}\right)^4-\left(\frac{T}{100}\right)^4\right)\frac{[(H_1-u)\cos\beta-R\cos(v-\varphi_0)\sin\beta][R-r_0\cos(v-\varphi_0)]}{\left[R^2+r_0^2-2Rr_0\cos(v-\varphi_0)+(u-H_1+r_0tg\beta)\right]^2}.$$

У точці на стінці резервуара нижче рівня нафтопродукту щільність теплового потоку внаслідок конвекційного обміну з рідиною в резервуарі описується законом Ньютона

$$q_8=\alpha_8(T_\ell-T),$$

де α_8 – коефіцієнт конвекційного теплообміну між стінкою і рідиною в резервуарі [17]:

$$\alpha_8=0{,}135\lambda_\ell\left(\frac{g\beta_\ell|T-T_\ell|}{\nu_\ell a_\ell}\right)^{1/3};$$

λ_ℓ, a_ℓ, ν_ℓ, β_ℓ – коефіцієнт теплопровідності, коефіцієнт температуропровідності, кінематична в'язкість і коефіцієнт температурного розширення рідини; g – прискорення вільного падіння.

Застосування метода скінчених різниць до системи рівнянь (3), (4) з відповідними крайовими і початковими умовами дозволяє визначити розподіл значень температури по стінці і покрівлі резервуара. В якості приклада на рис. 2 наведено розподіл температури по стінці резервуара РВС-10000 (D=28,5 м, H=18 м), заповненого дизельним пальним до рівня h=9 м, через 10 хв. після початку пожежі в аналогічному сусідньому резервуарі, розташованого на відстані 0,75D. Початкову температуру резервуара і температуру навколишнього середовища прийнято T_0=20 ºС. Вітер швидкістю 2 м/с направлений від резервуара, що горить, до резервуара, що нагрівається. Форму полум'я над резервуаром прийнято конусоподібною [18]. Систему координат було обрано таким чином, що півпериметру резервуара, оберненому в бік пожежі, відповідає діапазон кутів $\varphi=(90\div270)^o$.

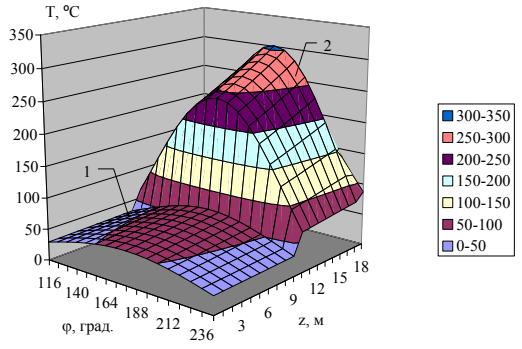


Рисунок 2 – Розподіл температури по стінці резервуара РВС-10000 через 10 хв. після початку пожежі в аналогічному сусідньому резервуарі: 1 – нижче рівня нафтопродукту; 2 – вище рівня нафтопродукту

Аналіз залежності на рис. 2 свідчить, що найбільшій небезпеці піддається верхній край стінки резервуара, що пов'язано з більшою величиною коефіцієнта його взаємного опромінення з факелом. Температура нижньої частини стінки резервуара (нижче рівня нафтопродукту) не досягає небезпечних значень – її величина не перевищує 70 ºС. Це відбувається внаслідок того, що коефіцієнт конвекційного теплообміну стінки з рідиною приблизно на 2 порядки перевищує відповідне значення для газів.

На рис. 3 за тих самих умов, що і для рис. 2, наведено розподіл температури по покрівлі резервуара РВС-10000.

Аналіз залежностей на рис. 3 свідчить, що на відміну від стінки температура покрівлі не досягає небезпечного значення: її максимальна величина не перевищує 150 ºС. Причиною цього є менше значення коефіцієнта взаємного опромінення з факелом. На рис. 4 показано динаміку зміни температури для деяких точок на стінці і покрівлі резервуара.

Із аналізу графічних залежностей на рис. 4 випливає, що суха стінка резервуара досягає температури самоспалахування парів дизельного пального через 10 хв. після початку пожежі, перетворюючись на джерело запалювання для них. Це вимагає термінового вжиття заходів щодо захисту резервуара від теплового впливу пожежі в сусідньому резервуарі, наприклад, шляхом подачі води на охолодження стінки.

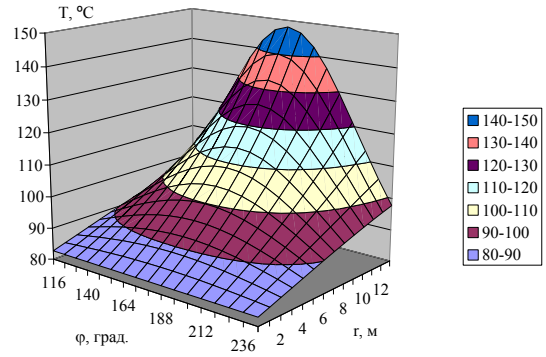


Рисунок 3 – Розподіл температури по покрівлі резервуара РВС-10000 через 10 хв. після початку пожежі в аналогічному сусідньому резервуарі

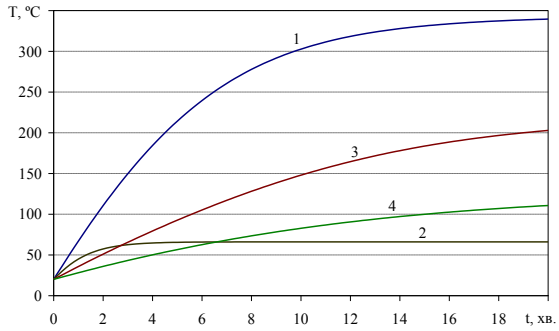


Рисунок 4 – Динаміка зміни температури в деяких точках на поверхні резервуара, обернених в бік пожежі (φ=180º): 1 – стінка, z=17 м; 2 – стінка, z=8 м; 3 – покрівля, r=13 м; 4 – центр покрівлі

Висновки та напрями подальших досліджень. Побудовано рівняння теплового балансу для стінки і покрівлі вертикального сталевого резервуара з нафтопродуктом в умовах теплового впливу пожежі в аналогічному сусідньому резервуарі. Модель спирається на рівняння теплопровідності сталевої оболонки резервуара і враховує променевий і конвекційний теплообмін з пожежею, навколишнім середовищем, рідиною в резервуарі і пароповітряною сумішшю в його газовому просторі. Визначено коефіцієнти взаємного опромінення і коефіцієнти конвекційного теплообміну для стінки і покрівлі резервуара. Розв'язання рівняння методом скінчених різниць дозволяє визначити розподіл температур по стінці і покрівлі резервуара в довільний момент часу. Показано, що найбільшій небезпеці піддається верхній край стінки резервуара,

обернений в бік пожежі. Зокрема, у випадку пожежі в резервуарі з дизельним пальним суха стінка сусіднього резервуара досягає температури самозаймання парів дизельного пального вже через 10 хв. після початку пожежі. Перспективи подальших досліджень пов'язані із врахуванням охолоджувальної дії води, що подається для захисту резервуара.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. НАПБ 05.035 – 2004. Інструкція щодо гасіння пожеж у резервуарах із нафтою та нафтопродуктами.
2. Аналітична довідка про пожежі та їх наслідки в Україні за 12 місяців 2022 року. url: https://indcz.dsns.gov.ua/upload/1/6/0/8/6/7/7/analitychna-dovidka-pro-pojeji-122022.pdf
3. Ding L., Khan F., Ji J. Risk-based safety measure allocation to prevent and mitigate storage fire hazards. Process Safety and Environmental Protection. 2020. Vol. 135. P. 282–293. doi: https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.01.008
4. Deng L., Tang F., Wang X. Uncontrollable combustion characteristics of energy storage oil pool: Modelling of mass loss rate and flame merging time of annular pools. Energy. 2021. Vol. 224. P. 120181. doi: https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120181
5. Li Y., Meng D., Yang L., Shuai J. Experimental study on the burning rate of continuously released spill fire on open surface with measurement of burning fuel thickness. Case Studies in Thermal Engineering. 2022. Vol. 36. P. 102217. doi: https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102217
6. Chen J., Wang D., Guo L., Wang Z., Kong D. Experimental study on flame morphology and flame radiation of pool fire sheltered by plate obstacle. Process Safety and Environmental Protection. 2022. Vol. 159. P. 243–250. doi: https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.12.053
7. Yang J., Zhang B., Chen L., Diao X., Hu Y., Suo G., Li R., Wang Q., Li J., Zhang J., Dou Z. Improved solid radiation model for thermal response in large crude oil tanks. Energy. 2023. Vol. 284. P. 128572. doi: https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128572
8. Ji J., Gong C., Wan H., Gao Z., Ding L. Prediction of thermal radiation received by vertical targets based on two-dimensional flame shape from rectangular n-heptane pool fires with different aspect ratios. Energy. 2019. Vol. 185. P. 644–652. doi: https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.083
9. Khakzad N. A methodology based on Dijkstra's algorithm and mathematical programming for optimal evacuation in process plants in the event of major tank fires. Reliability Engineering & System Safety. 2023. Vol. 236. P. 109291. doi: https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109291
10. Sharma A., Bhushan Mishra K. Experimental set-up to measure the maximum mass burning rate of storage tank fires. Process Safety and Environmental Protection. 2019. Vol. 131. P. 282–291. doi: https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.09.001
11. Shi C., Deng L., Ren F., Tang F. Experimental study on the flame height evolution of two adjacent hydrocarbon pool fires under transverse air flow. Energy. 2023. Vol. 262. P. 125520. doi: https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125520
12. Ahmadi O., Mortazavi S. B., Pasdarshahri H., Mohabadi H. A. Consequence analysis of large-scale pool fire in oil storage terminal based on computational fluid dynamic (CFD). Process Safety and Environmental Protection. 2019. Vol. 123. P. 379–389. doi: https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.01.006
13. Elhelw M., El-Shobaky A., Attia A., El-Maghlany W. M. Advanced dynamic modeling study of fire and smoke of crude oil storage tanks. Process Safety and Environmental Protection. 2021. Vol. 146. P. 670–685. doi: https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.12.002
14. Miao Z., Wenhua S., Ji W., Zhen C. Accident Consequence Simulation Analysis of Pool Fire in Fire Dike. Procedia Engineering. 2014. Vol. 84. P. 565–577. doi: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.469
15. He J., Yang L., Ma Y., Yang D., Li A., Huang L., Zhan Y. Simulation and application of a detecting rapid response model for the leakage of flammable liquid storage tank. Process Safety and Environmental Protection. 2020. Vol. 141. P. 390–401. doi: https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.04.053
16. Басманов О. Є., Максименко М. В. Моделювання впливу пожежі на сусідній резервуар з нафтопродуктом в умовах вітру. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2022. № 1 (35). С. 239–253. doi: https://doi.org/10.52363/2524-0226-2022-35-18
17. Oliinyk V., Basmanov O., Romanyuk I., Rashkevich O., Malovyk I. Building a model of heating an oil tank under the thermal influence of a spill fire. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. Vol. 4/10 (130). P. 21–28. doi: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.309731
18. Landucci G., Salzano E., Taveau J., Spadoni G., Cozzani V. Detailed Studies of Domino Scenarios. Domino Effects in the Process Industries. 2013. P. 229–243. doi: https://doi.org/10.1016/B978-0-444-54323-3.00011-7

REFERENCES

1. NAPB 05.035 – 2004. Instructions for extinguishing fires in tanks with oil and petroleum products.
2. Analytical report on fires and their consequences in Ukraine for 12 months of 2022. url: https://indcz.dsns.gov.ua/upload/1/6/0/8/6/7/7/analitychna-dovidka-pro-pojeji-122022.pdf
3. Ding, L., Khan, F., & Ji, J. (2020). Risk-based safety measure allocation to prevent and mitigate storage fire hazards. Process Safety and Environmental Protection, 135, 282–293. doi: https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.01.008
4. Deng, L., Tang, F., & Wang, X. (2021). Uncontrollable combustion characteristics of energy storage oil pool: Modelling of mass loss rate and flame merging time of annular pools. Energy, 224, 120181. doi: https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120181
5. Li, Y., Meng, D., Yang, L., & Shuai, J. (2022). Experimental study on the burning rate of continuously released spill fire on open surface with measurement of burning fuel thickness. Case Studies in Thermal Engineering, 36, 102217. doi: https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102217
6. Chen, J., Wang, D., Guo, L., Wang, Z., & Kong, D. (2022). Experimental study on flame morphology and flame radiation of pool fire sheltered by plate obstacle. Process Safety and Environmental Protection, 159, 243–250. doi: https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.12.053

7. Yang, J., Zhang, B., Chen, L., Diao, X., Hu, Y., Suo, G., Li, R., Wang, Q., Li, J., Zhang, J., & Dou, Z. (2023). Improved solid radiation model for thermal response in large crude oil tanks. Energy, 284, 128572. doi: https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128572
8. Ji, J., Gong, C., Wan, H., Gao, Z., & Ding, L. (2019). Prediction of thermal radiation received by vertical targets based on two-dimensional flame shape from rectangular n-heptane pool fires with different aspect ratios. Energy, 185, 644–652. doi: https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.083
9. Khakzad, N. (2023). A methodology based on Dijkstra's algorithm and mathematical programming for optimal evacuation in process plants in the event of major tank fires. Reliability Engineering & System Safety, 236, 109291. doi: https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109291
10. Sharma, A., & Bhushan Mishra, K. (2019). Experimental set-up to measure the maximum mass burning rate of storage tank fires. Process Safety and Environmental Protection, 131, 282–291. doi: https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.09.001
11. Shi, C., Deng, L., Ren, F., & Tang, F. (2023). Experimental study on the flame height evolution of two adjacent hydrocarbon pool fires under transverse air flow. Energy, 262, 125520. doi: https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125520
12. Ahmadi, O., Mortazavi, S. B., Pasdarshahri, H., & Mohabadi, H. A. (2019). Consequence analysis of large-scale pool fire in oil storage terminal based on computational fluid dynamic (CFD). Process Safety and Environmental Protection, 123, 379–389. doi: https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.01.006
13. Elhelw, M., El-Shobaky, A., Attia, A., & El-Maghlany, W. M. (2021). Advanced dynamic modeling study of fire and smoke of crude oil storage tanks. Process Safety and Environmental Protection, 146, 670–685. doi: https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.12.002
14. Miao, Z., Wenhua, S., Ji, W., & Zhen, C. (2014). Accident Consequence Simulation Analysis of Pool Fire in Fire Dike. Procedia Engineering, 84, 565–577. doi: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.469
15. He, J., Yang, L., Ma, Y., Yang, D., Li, A., Huang, L., & Zhan, Y. (2020). Simulation and application of a detecting rapid response model for the leakage of flammable liquid storage tank. Process Safety and Environmental Protection, 141, 390–401. doi: https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.04.053
16. Basmanov, O., & Maksymenko, V. (2022). Modeling the thermal effect of fire to the tank in the presence of wind. Problems of Emergency Situations, 1 (35), 239–253. doi: https://doi.org/10.52363/2524-0226-2022-35-18
17. Oliinyk, V., Basmanov, O., Romanyuk, I., Rashkevich, O., & Malovyk, I. (2024). Building a model of heating an oil tank under the thermal influence of a spill fire. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4/10 (130), 21–28. doi: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.309731
18. Landucci, G., Salzano, E., Taveau, J., Spadoni, G., & Cozzani, V. (2013). Detailed Studies of Domino Scenarios. Domino Effects in the Process Industries, 229–243. doi: https://doi.org/10.1016/B978-0-444-54323-3.00011-7

MODEL OF HEATING AN OIL TANK UNDER THE THERMAL INFLUENCE OF A FIRE IN AN ADJACENT TANK

O. Basmanov[1], D. Karpova[2], S. Harbuz[2], M. Volodchenko[1]

[1]Institute of Scientific Research on Civil Protection of the National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine
[2]National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine

KEYWORDS:
tank fire, heat balance equation, radiation heat transfer, convection

ABSTRACT

The object of the study is thermal processes occurring in a vertical steel tank with oil product under the thermal influence of a fire in an adjacent tank. Heat balance equations for the tank wall and roof were constructed. They are two-dimensional partial differential equations of heat conduction that take into account radiative and convective heat transfer from the fire, the environment, the liquid in the tank, and the vapor-air mixture in gas space of the tank. This approach is possible due to the significantly smaller thickness of the tank shell compared to its linear dimensions. The view factors for different parts of the tank with the flame and between themselves were calculated. It allows determining the radiative components of heat transfer. Similitude methods were used to construct estimates of convection heat exchange coefficients for tank wall and roof. It allows to determining the convective heat transfer. The application of the finite difference method for numerically solving the system of differential equations with the corresponding boundary and initial conditions allows determining the temperature distribution along the tank shell at an arbitrary time. It is shown that the upper edge of the tank wall facing the fire side is most at risk. It takes place due to both the higher value of flame view factor and the lack of contact with the liquid inside the tank. The case of a fire in one of the tanks of the tank group of four tanks with diesel fuel was studied. It was shown that temperature of the upper edge of the adjacent tank wall located on the leeward side reaches the value of auto-ignition temperature of diesel fuel vapor in 10 minutes after the start of the fire. The temperature of the tank wall below the liquid level does not exceed 70 ºC due to cooling by oil product. The temperature of tank roof is also less than critical value (about 200 ºC after 10 minutes heating) due to less value of flame view factor compared to the tank wall. The proposed model can be used for determining the parts of the tank wall and roof that should be cooled. Also it allows determining the critical time for the start of water supply for cooling.

УДК 614.84

БІОМЕХАНІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ РУХУ ОСІБ ІЗ ДВОСТОРОННІМИ ПРОТЕЗАМИ НИЖНІХ КІНЦІВОК ПІД ЧАС ЕВАКУАЦІЇ В УМОВАХ ПОЖЕЖІ

https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.1.(19).120-128

Хлевной О. В.[1], ORCID iD 0000-0003-2846-3480
Жезло-Хлевна Н. В.[1], ORCID iD 0009-0005-3768-2863
Доценко О. Г.[2], ORCID iD 0000-0001-7437-8733
Борисова А. С.[2], ORCID iD 0000-0002-8700-0761
Калиновський А. Я.[3], ORCID iD 0000-0002-1021-5799
*E-mail: mio1488@yahoo.com

[1]Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна
[2]Інститут наукових досліджень з цивільного захисту НУЦЗ України, Україна
[3]Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 30.04.2025
Пройшла рецензування: 12.05.2025

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

двосторонні ампутації, модульні протези, біонічні протези, енерговитрати, швидкість евакуації, транстібіальні ампутації, трансфеморальні ампутації, пожежна безпека

АНОТАЦІЯ

У статті проаналізовано, що модульні протези забезпечують швидкість 25-50% від доампутаційної на горизонтальних ділянках (0,4-0,8 м/с) і 10-30% на сходах (0,15-0,4 м/с), тоді як для біонічних характерними є кращі показники до 40-70% (0,7-1,2 м/с) і 20-45% (0,25-0,6 м/с) відповідно. Енерговитрати зростають на 5-10% на кожен кілограм ваги протеза, досягаючи +40-60% для транстібіальних і +100-120% для трансфеморальних ампутацій. На основі даних створено графічні залежності енерговитрат від ваги протезів і порівняння швидкості евакуації, що підтверджують значний вплив типу протеза та рівня ампутації. Результати вказують на необхідність адаптації наявних методик розрахунку тривалості евакуації для врахування зниженої швидкості та високої втомлюваності (дистанція до 50-100 м) осіб з двосторонніми протезами нижніх кінцівок.

Наукова новизна полягає у комплексному аналізі біомеханічних характеристик двосторонніх протезів у контексті евакуації, що вперше проведено для українських реалій з урахуванням воєнного контексту. Встановлено кількісні показники швидкості та енерговитрат, які можуть слугувати основою для оновлення чинних нормативних документів. Практична цінність роботи полягає у наданні даних для розробки інклюзивних евакуаційних стратегій, що враховують потреби осіб із обмеженою мобільністю, зокрема в умовах надзвичайних ситуацій.

Постановка проблеми. Повномасштабна війна в Україні призвела до значного зростання кількості осіб із ампутаціями кінцівок, включаючи військових, цивільних і дітей. За оцінками The Wall Street Journal, станом на липень 2023 року кількість українців із втратою верхніх або нижніх кінцівок сягала приблизно 50 тисяч. Дані Міністерства соціальної політики України свідчать, що до червня 2023 року по реабілітаційні засоби звернулися 58 852 особи, із яких 20737 отримали протези [1]. У період із січня до травня 2024 року протезами верхніх і нижніх кінцівок було забезпечено 5 248 осіб, причому протези нижніх кінцівок становили понад 55% від загальної кількості [2]. Таким чином, щорічний приріст осіб, які потребують протезування, становить приблизно 10 тисяч, і ця тенденція зберігатиметься після припинення активних бойових дій, оскільки проміжок часу між травмою та протезуванням триває, як правило, кілька місяців.

Оскільки точних даних про двосторонні ампутації нижніх кінцівок немає, можна зробити приблизну оцінку. У контексті воєнних травм частка двосторонніх ампутацій нижніх кінцівок зазвичай становить 10-15% від загальної кількості ампутацій нижніх кінцівок, залежно від характеру травм (наприклад, вибухові ураження) [3]. Виходячи з того, що протези нижніх кінцівок складають 55% від усіх протезів (приблизно 28 600 осіб із 52 000 до 2024 року), кількість двосторонніх ампутацій нижніх кінцівок імовірно склала 3000–5000 осіб і продовжує збільшуватися щонайменше на 500 щороку. Ця оцінка є приблизною, оскільки залежить від типу травм і доступності медичних даних.

Евакуація людей під час пожежі є критично важливим процесом, що вимагає швидкого та безпечного переміщення осіб із зони небезпеки. Виходячи із наведених вище даних, виникає потреба в адаптації підходів до організації евакуаційних заходів. Біомеханічні особливості руху таких осіб, включно з підвищеним ризиком втрати рівноваги, зниженою координацією, високими енерговитратами та чутливістю до екстремальних умов, суттєво ускладнюють їхню евакуацію порівняно з людьми без ампутацій. Водночас сучасні нормативні документи та наукові дослідження з евакуації при пожежі недостатньо враховують специфіку осіб з двосторонніми протезами, що створює прогалини в розумінні їхньої поведінки та потреб у таких ситуаціях.

Відсутність систематизованих даних про вплив біомеханічних обмежень на швидкість і безпеку евакуації осіб із двосторонніми протезами нижніх кінцівок ускладнює розробку ефективних стратегій забезпечення їхньої безпеки. Це питання набуває особливої актуальності в контексті соціальної інклюзії та захисту прав людей з інвалідністю, адже забезпечення рівних можливостей для евакуації є невід'ємною частиною створення безпечного середовища. Таким чином, виникає необхідність теоретичного аналізу біомеханічних особливостей руху таких осіб у стресових умовах пожежі, що дозволить виявити ключові виклики та сформулювати рекомендації для подальших досліджень і практичних рішень.

Дослідження біомеханічних особливостей руху осіб із двосторонніми протезами нижніх кінцівок під час евакуації має прямий зв'язок із низкою важливих наукових і практичних завдань. З наукової точки зору, воно сприяє поглибленню розуміння біомеханіки руху в екстремальних умовах, заповнюючи прогалину в літературі щодо евакуаційної поведінки осіб із двосторонніми ампутаціями. Це створює основу для розробки теоретичних моделей евакуації, які враховують унікальні фізіологічні та технічні характеристики такої категорії людей. З огляду на практичну складову, результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення будівельних норм і стандартів, що регулюють доступність і безпеку евакуаційних шляхів, а також для розробки спеціалізованих протоколів евакуації в закладах із високим рівнем відвідуваності. Крім того, дослідження сприятиме підвищенню готовності служб порятунку до роботи з особами з інвалідністю, що є важливим елементом забезпечення безпеки в умовах надзвичайних ситуацій. Таким чином, вирішення цієї проблеми має значення для вдосконалення систем протипожежного захисту та реалізації принципів інклюзивного суспільства.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Біомеханіка руху осіб із двосторонніми протезами нижніх кінцівок у контексті евакуації при пожежі є відносно новою та недостатньо розвинутою темою, що обумовлено обмеженою кількістю спеціалізованих праць, які б безпосередньо розглядали цей специфічний сценарій. Натомість сучасна наукова література зосереджується переважно на загальних аспектах біомеханіки протезування, реабілітації та адаптації осіб з ампутаціями до повсякденного життя, що дозволяє

частково екстраполювати дані на умови евакуації.

Значна частина досліджень присвячена біомеханіці ходи осіб із двосторонніми протезами. Наприклад, у роботі [4] встановлено, що пересування з двосторонніми транстібіальними протезами підвищує енерговитрати на 40-60% порівняно з нормою, а для трансфеморальних ампутацій цей показник може досягати 100-120%. Такі дані свідчать про швидку втому осіб із двома протезами, що може критично впливати на їхню здатність тривало пересуватися в умовах евакуації, де час і фізична витривалість є ключовими. У роботі [5] додатково зазначено, що сучасні біонічні протези підвищують швидкість ходи до 1.5 м/с на горизонтальних поверхнях порівняно з 0,8-1,2 м/с для механічних аналогів, однак їхня ефективність знижується на складних траєкторіях, таких як сходи, де швидкість падає до 0,2-0,4 м/с. Ці показники вказують на потенційні труднощі при подоланні архітектурних бар'єрів під час евакуації.

Окремі дослідження, зокрема [6], акцентують увагу на проблемах балансу та стабільності. Особи з двосторонніми протезами мають на 30-50% вищий ризик втрати рівноваги, а час відновлення стабільності після зовнішнього впливу (наприклад, поштовху) становить 2-3 секунди проти 1 секунди в умовно здорових осіб. У контексті евакуації, де можливі контакти з натовпом або пересування нерівними поверхнями, це створює додаткові ризики травматизації. У дослідженні [7] проаналізовано зниження координації руху у осіб із двома протезами, особливо під час зміни напрямку чи спуску сходами, що може уповільнювати евакуацію до 0,3-0,5 м/с порівняно з 1-1,5 м/с для осіб без ампутацій.

Попри наявність таких даних, література з евакуації при пожежі рідко розглядає осіб із двосторонніми протезами як окрему групу. Стандарти протипожежної безпеки, такі як українські ДСТУ та ДБН [9, 10] зосереджуються на загальних рекомендаціях для осіб з інвалідністю, ігноруючи специфіку біомеханічних обмежень осіб з протезами. Деякі роботи з моделювання евакуації [11, 12] вказують на необхідність урахування різної швидкості руху в гетерогенних групах, але не надають конкретних даних для осіб із протезами. Це створює прогалину в розумінні того, як такі особи взаємодіють із евакуаційним середовищем, зокрема в умовах задимлення, спеки чи обмеженої видимості.

Додатковий інтерес викликають дослідження впливу екстремальних умов на ефективність протезів. Наприклад, є дані [13] про зниження зчеплення протезів на вологих поверхнях на 20-30%, що може бути актуальним для евакуації через зони дії систем пожежогасіння. Високі температури (понад 40°C), характерні для пожежі, також здатні знижувати ефективність протезів на 10% через деформацію матеріалів, що частково висвітлено в технічних звітах компаній-виробників.

Водночас сучасні публікації з реабілітації та протезування [8] наголошують на потенціалі тренувальних програм для підвищення мобільності осіб із двома протезами, що може бути перспективним для підготовки до евакуаційних сценаріїв. Проте такі програми рідко враховують стресові фактори, що є типовими для пожежі. Це вказує на необхідність інтеграції даних із біомеханіки, психології та проведення натурних експериментальних досліджень із моделювання надзвичайних ситуацій для створення цілісної картини.

Таким чином, аналіз літератури засвідчує, що хоча окремі аспекти біомеханіки руху осіб із двосторонніми протезами добре вивчені в контексті повсякденної активності, їхня поведінка в умовах евакуації при пожежі залишається недослідженою. Основними невирішеними питаннями є кількісна оцінка впливу стресових умов на швидкість і безпеку евакуації, взаємодія осіб із двома протезами з архітектурними бар'єрами в реальних сценаріях, а також розробка

адаптованих протоколів евакуації. Ці прогалини підкреслюють актуальність подальших досліджень, які б поєднували біомеханічний аналіз із практичними аспектами протипожежної безпеки.

Методи дослідження. Дослідження має теоретичний характер і спрямоване на систематизацію та аналіз наукових даних про біомеханіку руху осіб із двосторонніми протезами нижніх кінцівок під час евакуації при пожежі. Основним методом є літературний огляд, який передбачає пошук, відбір і критичний аналіз публікацій, що стосуються біомеханіки руху, протезування та евакуаційних процесів.

У рамках дослідження виконано систематичний пошук у міжнародних наукових базах даних, зокрема PubMed, Google Scholar і ResearchGate, за ключовими словами: "bilateral lower limb prosthesis", "biomechanics of gait", "prosthetic mobility", "evacuation behavior" і "fire evacuation". Додатково проаналізовано нормативні документи, такі як ДБН, ДСТУ [9, 10], для оцінки їхньої відповідності потребам осіб із двосторонніми протезами. Аналіз стосувався статей, які містять кількісні дані про енерговитрати, швидкість руху, стабільність і координацію осіб із двосторонніми протезами, а також робіт, присвячених проблемам евакуації осіб із зниженою мобільністю.

Якісний аналіз відібраних даних був зосереджений на виявленні прогалин у сучасних дослідженнях, зокрема щодо евакуації осіб із двома протезами в умовах стресу, задимлення чи архітектурних бар'єрів. Кількісний аналіз передбачав систематизацію біомеханічних показників, таких як швидкість ходи, енерговитрати, час стабілізації балансу та швидкість спуску сходами. Дані було узагальнено та порівняно з характеристиками осіб без ампутацій.

На основі отриманих даних було сформовано узагальнену модель біомеханічних обмежень, яка враховує вплив балансу, координації, енерговитрат, рівня ампутації і типу протезів на евакуаційну поведінку. Модель адаптовано до умов пожежі, включаючи такі фактори, як зниження зчеплення протезів на вологих поверхнях та вплив високих температур.

Дослідження не включає емпіричних експериментів через відсутність доступу до учасників із двосторонніми протезами та складність відтворення реальних умов пожежі. Аналіз базується на екстраполяції даних із повсякденних сценаріїв руху, що може частково обмежувати точність прогнозів для стресових умов.

Цей методологічний підхід дозволяє систематизувати наявні знання, виявити ключові біомеханічні виклики та сформулювати гіпотези для подальших емпіричних досліджень, спрямованих на підвищення безпеки евакуації осіб із двосторонніми протезами нижніх кінцівок.

Формулювання цілей дослідження. Мета роботи – систематизувати та проаналізувати біомеханічні особливості руху осіб із двосторонніми протезами нижніх кінцівок в контексті евакуації при пожежі для виявлення ключових обмежень і формування теоретичної основи для розробки ефективних евакуаційних стратегій.

Задля досягнення мети необхідно вирішити низку завдань дослідження:

- провести огляд наукової літератури з біомеханіки ходи, енерговитрат, стабільності та координації осіб із двосторонніми протезами, узагальнивши кількісні показники (швидкість руху, час стабілізації балансу) для оцінки їхнього впливу на евакуаційну поведінку.
- визначити біомеханічні виклики евакуації при пожежі, включаючи вплив типу протезів (механічних і біонічних), рівня ампутації, стресових умов (задимлення, температура, вологість) і архітектурних бар'єрів на швидкість і безпеку руху.
- виявити прогалини в сучасних дослідженнях і нормативних підходах до

евакуації осіб із двосторонніми протезами та сформулювати напрями для подальших наукових і практичних розробок.

Виклад основного матеріалу дослідження. Особи з двосторонніми протезами нижніх кінцівок стикаються з суттєвими біомеханічними обмеженнями, які впливають на їхню здатність до швидкої та безпечної евакуації. Одним із основних факторів є порушення балансу та стабільності. Через відсутність природних пропріоцептивних сигналів ризик втрати рівноваги і падіння зростає на 30-50% порівняно з особами із односторонніми протезами. Час відновлення стабільності після зовнішнього впливу, наприклад, поштовху в натовпі, становить 2-3 секунди проти 1 секунди у осіб без ампутацій. Умови евакуації, такі як нерівні поверхні чи сходи, додатково ускладнюють підтримання рівноваги, підвищуючи відхилення центру маси тіла на 20-25%. Ці дані підтверджують, що стабільність є критичним обмеженням, яке може призводити до падінь і затримок під час евакуації.

Використання двобічних протезів нижніх кінцівок суттєво ускладнює координацію руху. Швидкість зміни напрямку руху знижується на 40%, а спуск сходами займає на 60-80% більше часу через необхідність точного розміщення протеза. Середня швидкість спуску становить 0,3-0,5 м/с порівняно з 1-1,6 м/с у осіб без ампутацій [5]. Це свідчить про те, що протези знижують ефективність маневрування в динамічному евакуаційному середовищі. Що важливо, таку поведінку дуже важко відтворювати за допомогою комп'ютерних симуляторів.

Ще одним визначальним фактором евакуації осіб з протезами є енерговитрати. Ампутація передбачає втрату деяких м'язів, внаслідок чого навантаження перерозподіляється на інші групи. Також встановлено, що маса протеза (1,5-3 кг на кінцівку) додатково збільшує енерговитрати на 5-10% на кожен кілограм, що особливо відчутно при тривалому русі [4]. Пересування з двосторонніми транстібіальними протезами потребує на 40-60% більше енергії, а для трансфеморальних ампутацій цей показник сягає 100-120% (рисунок 1).

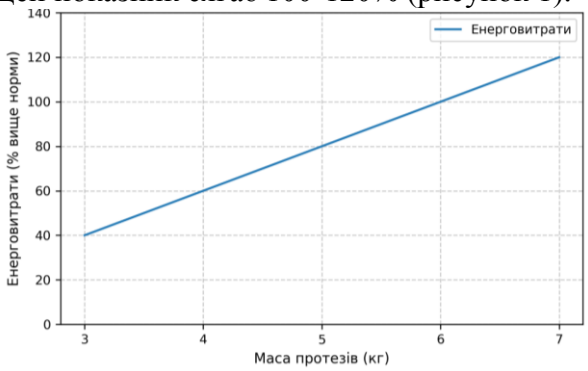


Рисунок 1 – Приблизне зростання енерговитрат залежно від маси протезів (узагальнено авторами)

При швидкості пересування, типовій для евакуації, критична втома (потреба в зупинці для відпочинку або суттєве зниження швидкості) в осіб з двома протезами може наставати за 2-3 хвилини, тоді як час руху в безпечну зону може потребувати значно більше часу. Якщо врахувати ймовірну наявність на окремих ділянках евакуаційних шляхів підвищених температур (понад 30°C), збільшення енерговитрат може додатково зростати на 10-15% через порушення терморегуляції. Ці дані підкреслюють, що фізична витривалість осіб із двосторонніми протезами обмежує їхню здатність долати тривалі евакуаційні маршрути.

Важливу роль у формуванні біомеханічних характеристик відіграє тип протезів та рівень ампутації. У порівнянні зі швидкістю евакуації осіб без ампутацій (100 м/хв, або 1,67 м/с на горизонтальних ділянках, і 80-100 м/хв, або 1,33-1,67 м/с на сходах), подвійні модульні протези забезпечують значно нижчі показники. Для осіб, що користуються двобічними транстібіальними протезами швидкість на горизонтальних ділянках може становити 35-50% від доампутаційної (0,6-0,8 м/с, або 35-50 м/хв), що зумовлено збереженням колінного суглоба, але обмежено вагою протезів (3-5 кг) і енерговитратами (+40-60%). На сходах швидкість зменшується до 20-30% (0,25-0,4 м/с, або 15-25 м/хв) через ускладнену координацію.

Особи, що користуються двобічними трансфеморальними протезами можуть досягати лише 25-40% на горизонтальних евакуаційних шляхах (0,4-0,7 м/с, або 25-40 м/хв) і 10-20% на сходах (0,15-0,3 м/с, або 10-15 м/хв), що пов'язано з втратою колінних суглобів, більшою вагою протезів (5-7 кг) і високими енерговитратами (+100-120%).

Біонічні протези, завдяки активним компонентам і адаптивним механізмам, дають змогу досягнути дещо кращих показників швидкості евакуації. Для транстібіальних протезів швидкість на горизонтальних ділянках становить 50-70% від швидкості до ампутації (0,8-1,2 м/с, або 50-70 м/хв), а на сходах — 30-45% (0,4-0,6 м/с, або 25-35 м/хв), що зумовлено зниженням енерговитрат до 20-40% вище норми та покращеною стабільністю. Трансфеморальні біонічні протези дають змогу досягнути 40-60% на горизонтальних ділянках (0,7-1,0 м/с, або 40-60 м/хв) і 20-35% на сходах (0,25-0,5 м/с, або 15-30 м/хв), оскільки мікропроцесорні коліна частково компенсують втрату суглоба, але енерговитрати залишаються високими (+70-90%) (рисунок 2).

Доцільно проаналізувати деякі додаткові умови, які за певних умов можуть виникати в процесі евакуації.

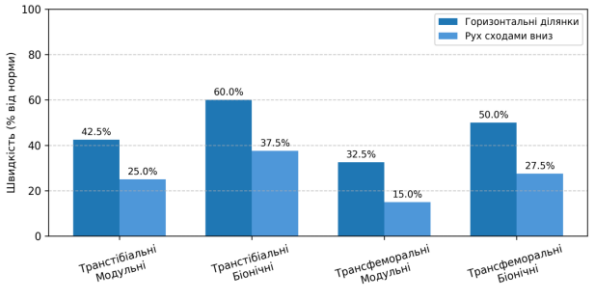


Рисунок 2 – Порівняння швидкості руху учасників евакуації з двосторонніми протезами

Це, зокрема, задимлення евакуаційних шляхів, розлита на підлогах вода, підвищена температура повітря. На вологих покриттях знижується зчеплення протезів із поверхнею, що зменшує швидкість і підвищує ризик падіння. У задимленому середовищі з видимістю менше 2 м погіршується точність розміщення протеза (особливо це стосується сходів), що сповільнює швидкість руху. В рідкісних випадках високі температури (понад 40°C) можуть викликати нагрів матеріалів протезів, знижуючи їхню ефективність через деформацію чи втрату амортизаційних властивостей.

Загалом причинно-наслідкові зв'язки між біомеханічними особливостями руху осіб із двосторонніми протезами нижніх кінцівок під час евакуації та можливими проблемами наведені на рисунку 4.

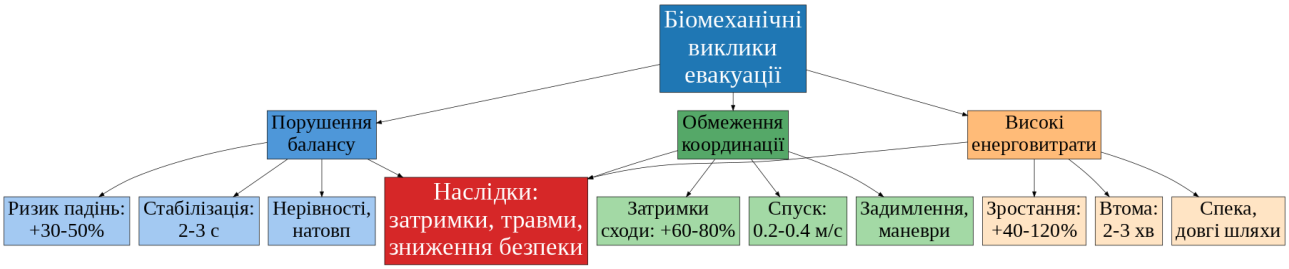


Рисунок 3 – Біомеханічні виклики та їх вплив на евакуацію осіб із двосторонніми протезами нижніх кінцівок

(розроблено авторами)

Аналіз літератури виявив значні прогалини в розумінні евакуаційної поведінки осіб із двосторонніми протезами. Сучасні стандарти протипожежної безпеки не враховують їхніх специфічних потреб, обмежуючись загальними рекомендаціями для осіб з інвалідністю. Наприклад, відповідно до [10] учасники евакуації з протезами віднесені до групи мобільності М2 з початковою швидкістю руху 30 м/хв. При цьому затверджена у цьому стандарті методика не дозволяє враховувати вид

протезу та рівень ампутації, що не відображає реального стану.

Моделювання евакуаційної поведінки людей з подвійними протезами нижніх кінцівок у програмному середовищі Pathfinder супроводжується низкою складностей, пов'язаних із відсутністю стандартних профілів таких осіб та необхідністю точного врахування їхніх фізіологічних і поведінкових особливостей. Зокрема, труднощі виникають при встановленні реалістичних параметрів швидкості пересування, реакції на тривогу, здатності пересуватися сходами чи пандусами, а також взаємодії з іншими учасниками евакуації. Існуючі моделі не враховують можливі зміни темпу руху в умовах стресу або обмеженої видимості, що може призвести до заниження ризиків у симуляціях. Тому виникає нагальна потреба в отриманні емпіричних (експериментальних) даних – зокрема шляхом спостереження або відеоаналізу тренувальних евакуацій, – для точного налаштування агентів, які репрезентують людей з протезами, що підвищить валідність результатів моделювання та ефективність планування евакуаційних заходів.

Отримані результати є обґрунтованими завдяки комплексному підходу до аналізу. Екстраполяція даних про біомеханіку протезування на умови евакуації базується на логічному врахуванні факторів середовища (температура, задимлення, поверхні), що підтверджується технічними характеристиками протезів і дослідженнями евакуаційної поведінки. По-третє, синтез якісного та кількісного аналізу дозволив не лише узагальнити наявні показники, а стати підґрунтям для розробки спеціальних практичних рекомендацій. Наприклад, зниження швидкості руху до 0,5-0,7 м/с на задимлених ділянках чи втома за 2-3 хвилини вказують на необхідність скорочення евакуаційних маршрутів впровадженням допоміжних засобів, зокрема, протипожежних ліфтів.

Таким чином, дослідження встановило, що біомеханічні особливості осіб із двосторонніми протезами (знижена стабільність, обмежена координація, високі енерговитрати та чутливість до умов середовища) суттєво ускладнюють їхню евакуацію при пожежі. Ці обмеження необхідно враховувати при розробці будівельних норм, правил та тренувальних програм, щоб забезпечити безпеку та інклюзивність.

Висновки та напрями подальших досліджень. У роботі досліджено біомеханічні особливості евакуації при пожежі осіб із двосторонніми протезами нижніх кінцівок Виконаний теоретичний аналіз ґрунтується на синтезі сучасних наукових даних із біомеханіки протезування, фізіології та моделювання евакуаційних процесів, що забезпечує обґрунтованість отриманих результатів.

Проведене дослідження дозволило систематизувати ключові обмеження, що впливають на їхню безпеку та ефективність руху. Аналіз показав, що порушення балансу (ризик падінь +30-50%, час стабілізації 2-3 с), обмеження координації (затримки на сходах +60-80%, швидкість спуску 0,2-0,4 м/с) та високі енерговитрати (+40-120% порівняно з нормою, настання втоми за 2-3 хв) суттєво ускладнюють евакуацію. Екстремальні умови середовища, такі як задимлення (зменшення швидкості орієнтовно на 25%), вологість (підвищення ризику посковзнутися на 20-30%) і температура додатково погіршують ситуацію. Порівняння типів протезів виявило переваги біонічних моделей на горизонтальних ділянках (швидкість до 1,5 м/с, енерговитрати +55%), однак на сходах їхня ефективність наближається до механічних (0,3-0,4 м/с).

Виявлено відсутність в сучасних нормативних підходах до евакуації осіб із двосторонніми протезами, зокрема відсутність адаптованих рекомендацій у ДСТУ. Результати підкреслюють необхідність проведення експериментальних досліджень (зокрема,

із застосування засобів штучного інтелекту і машинного навчання [14]) з метою встановлення регресійних залежностей швидкості руху учасників евакуації з двосторонніми протезами від типів протезів і щільності евакуаційних потоків, а також інших факторів. Подальші дослідження будуть зосереджені на моделюванні евакуаційної поведінки в реальних умовах і розробці інклюзивних нормативно-технічних рекомендацій для підвищення безпеки осіб із протезами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Черг для військових на протезування сьогодні немає. Як працює система допомоги тим, хто втратив кінцівки. Glavcom. URL: https://glavcom.ua/interviews/cherhi-dlja-vijskovikh-na-protezuvannja-sohodni-nemaje-jak-pratsjuje-sistema-dopomohi-tim-khto-vtrativ-kintsivki-1010816.html (дата звернення: 15.03.2025).
2. Цема Є., Хоменко І., Беспаленко А., Бур'янов А., Мішалов В., Кіх А. Клініко-статистичне дослідження рівня ампутації кінцівки у поранених // Клінічна хірургія. 2017. № 10. С. 51. DOI: 10.26779/2522-1396.2017.10.51.
3. Суполова К., Баркасі Д. Значення реабілітації у пацієнтів з двосторонньою трансфеморальною ампутацією // Україна. Здоров'я нації. 2022. № 3. С. 93–96. DOI: https://doi.org/10.24144/2077-6594.3.1.2022.266038
4. Waters R. L, Mulroy S. The energy expenditure of normal and pathologic gait. Gait Posture. 1999 Jul;9(3): 207-31. doi: 10.1016/s0966-6362(99)00009-0. PMID: 10575082.
5. Rigney S, Simmons A, Kark L. Energy Storage and Return Prostheses: A Review of Mechanical Models. Crit Rev Biomed Eng. 2016;44(4):269-292. doi: 10.1615/CritRevBiomedEng.2017020031. PMID: 29199578.
6. Bateni H. Postural Sway in Lower Extremity Amputees and Older Adults May Suggest Increased Fall Risk in Amputees. Can Prosthet Orthot J. 2020 Sep 20;3(2):33804. doi: 10.33137/cpoj.v3i2.33804.
7. Chen, L., Feng, Y., Chen, B. *et al.* Improving postural stability among people with lower-limb amputations by tactile sensory substitution. *J NeuroEngineering Rehabil* **18**, 159 (2021). https://doi.org/10.1186/s12984-021-00952-x
8. Hofstad C, Linde H, Limbeek J, Postema K. Prescription of prosthetic ankle-foot mechanisms after lower limb amputation. Cochrane Database Syst Rev. 2004;2004(1):CD003978. doi: 10.1002/14651858.CD003978.pub2.
9. ДСТУ 8828:2019. Пожежна безпека. Загальні положення. [Чинний від 2020-01-01]. Вид. офіц. Київ, 2018. 163 с.
10. ДБН В.2.2-40:2018. Інклюзивність будівель і споруд. [Чинний від 2019-04-01]. Вид. офіц. Київ, 2017. 70 с.
11. Kuligowski, Erica. (2020). Evacuation decision-making and behavior in wildfires: Past research, current challenges and a future research agenda. Fire Safety Journal. 120. 103129. 10.1016/j.firesaf.2020.103129.
12. Хлевной О. В., Харишин Д. В., Назаровець О. Б. Проблемні питання розрахунку часу евакуації при пожежах у закладах дошкільної та середньої освіти з інклюзивними групами // Пожежна безпека. 2020. № 29. С. 72–76. DOI: 10.32447/20784643.26.2022.05.
13. Fiedler, Goeran & Akins, Jonathan & Cooper, Rosemarie & Munoz, Santiago & Cooper, Rory. (2014). Rehabilitation of People with Lower-Limb Amputations. Current Physical Medicine and Rehabilitation Reports. In Press. 10.1007/s40141-014-0068-8.
14. Khlevnoi, O., Burak, N., Borzov, Y., Raita, D. Neural Network Analysis of Evacuation Flows According to Video Surveillance Cameras. In: Babichev, S., Lytvynenko, V. (eds) Lecture Notes in Data Engineering, Computational Intelligence, and Decision Making. ISDMCI 2022, vol 149. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16203-9_35.
15. Hanna E. What Do You Want to Do With the Leg? A Critical Narrative Review of theUnderstandings and Implications of Disposal in the Context of Limb Amputations. SAGEOpen. 2019; 9 (2) doi:10.1177/215824401985995
16. Abouammoh N, Aldebeyan W, Abuzaid R. Experiences and needs of patients with lower limbamputation in Saudi Arabia: a qualitative study. East Mediterr Health J. 2020.doi:10.26719/emhj.20.124.

0

REFERENCES

1. There are no queues for military prosthetics. How the state is helping those who have lost limbs. URL: https://glavcom.ua/interviews/cherhi-dlja-vijskovikh-na-protezuvannja-sohodni-nemaje-jak-pratsjuje-sistema-dopomohi-tim-khto-vtrativ-kintsivki-1010816.html#google_vignette (date of access: March 15, 2025).
2. Tsema, Ye., Khomenko, I., Bespalenko, A., Bur'ianov, A., Mishalov, V., & Kikh, A. (2017). Clinical and statistical study of the level of limb amputation in the wounded. *Klinichna khirurhiia*, (10), 51. https://doi.org/10.26779/2522-1396.2017.10.51
3. Supolova, K., & Barkasi, D. (2022). The importance of rehabilitation in patients with bilateral transfemoral amputation. *Ukraina. Zdorovia natsii*, (3), 93–96. https://doi.org/10.24144/2077-6594.3.1.2022.266038
4. Waters R. L, Mulroy S. The energy expenditure of normal and pathologic gait. Gait Posture. 1999 Jul;9(3): 207-31. doi: 10.1016/s0966-6362(99)00009-0. PMID: 10575082.
5. Rigney S, Simmons A, Kark L. Energy Storage and Return Prostheses: A Review of Mechanical Models. Crit Rev Biomed Eng. 2016;44(4):269-292. doi: 10.1615/CritRevBiomedEng.2017020031. PMID: 29199578.
6. Bateni H. Postural Sway in Lower Extremity Amputees and Older Adults May Suggest Increased Fall Risk in Amputees. Can Prosthet Orthot J. 2020 Sep 20;3(2):33804. doi: 10.33137/cpoj.v3i2.33804.
7. Chen, L., Feng, Y., Chen, B. *et al.* Improving postural stability among people with lower-limb amputations by tactile sensory substitution. *J NeuroEngineering Rehabil* **18**, 159 (2021). https://doi.org/10.1186/s12984-021-00952-x
8. Hofstad C, Linde H, Limbeek J, Postema K. Prescription of prosthetic ankle-foot mechanisms after lower limb amputation. Cochrane Database Syst Rev. 2004;2004(1):CD003978. doi: 10.1002/14651858.CD003978.pub2.
9. DSTU 8828:2019. Fire Security. Terms. [Valid from 2020-01-01]. Vyd. offic. Kyiv, 2018. 163 p.
10. DBN V.2.2-40:2018. Inclusiveness of buildings and structures. [Valid from 2019-04-01]. Kyiv, 2017. 70 p.
11. Kuligowski, Erica. (2020). Evacuation decision-making and behavior in wildfires: Past research, current challenges and a future research agenda. Fire Safety Journal. 120. 103129. 10.1016/j.firesaf.2020.103129.

12. Khlevnoi O.V., Kharyshyn D.V., Nazarovets O.B. Problems of calculating the time of evacuation in case of fires in preschool and secondary education institutions with inclusive groups. Fire safety. Lviv, 2020. Vol. 29. pp. 136–141. DOI: 10.32447/20786662.37.2020.11.
13. Fiedler, Goeran & Akins, Jonathan & Cooper, Rosemarie & Munoz, Santiago & Cooper, Rory. (2014). Rehabilitation of People with Lower-Limb Amputations. Current Physical Medicine and Rehabilitation Reports. In Press. 10.1007/s40141-014-0068-8.
14. Khlevnoi, O., Burak, N., Borzov, Y., Raita, D. Neural Network Analysis of Evacuation Flows According to Video Surveillance Cameras. In: Babichev, S., Lytvynenko, V. (eds) Lecture Notes in Data Engineering, Computational Intelligence, and Decision Making. ISDMCI 2022, vol 149. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16203-9_35.
15. Hanna E. What Do You Want to Do With the Leg? A Critical Narrative Review of theUnderstandings and Implications of Disposal in the Context of Limb Amputations. SAGEOpen. 2019; 9 (2) doi:10.1177/215824401985995.
16. Abouammoh N, Aldebeyan W, Abuzaid R. Experiences and needs of patients with lower limbamputation in Saudi Arabia: a qualitative study. East Mediterr Health J. 2020.doi:10.26719/emhj.20.124.

BIOMECHANICAL CHARACTERISTICS OF MOVEMENT OF PERSONS WITH BILATERAL LOWER LIMB PROSTHESES DURING EVACUATION IN FIRE CONDITIONS

O. Khlevnoi[1], N. Zhezlo-Khlevna[1], O. Dotsenko[2], A. Borysova[2], A. Kalynovskyi[3]

[1]Lviv State University of Life Safety, Ukraine
[2]Institute of Scientific Research on Civil Protection of the National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine
[3]Національний університет цивільного захисту України, Україна

KEYWORDS:
bilateral amputations, modular prostheses, bionic prostheses, energy expenditure, evacuation speed, transtibial amputations, transfemoral amputations, fire safety

ABSTRACT

The article examines the biomechanical constraints of individuals with bilateral lower limb amputations during fire evacuation, driven by the full-scale war in Ukraine, which has increased the number of such individuals (over 50,000 as of 2023). The research focuses on the functional characteristics of modular and bionic prostheses (weight 3-7 kg) for transtibial and transfemoral amputations, particularly their impact on energy expenditure and movement speed. The study aims to assess energy costs and evacuation speed to inform the standardization of fire safety regulations for evacuation routes and exits. The analysis reveals that modular prostheses enable speeds of 25-50% of pre-amputation levels on horizontal surfaces (0.4-0.8 m/s) and 10-30% on stairs (0.15-0.4 m/s), while bionic prostheses achieve higher rates of 40-70% (0.7-1.2 m/s) and 20-45% (0.25-0.6 m/s), respectively. Energy expenditure increases by 5-10% per kilogram of prosthesis weight, reaching +40-60% for transtibial and +100-120% for transfemoral amputations. Graphical dependencies of energy costs on prosthesis weight and comparisons of evacuation speeds were developed, confirming the significant influence of prosthesis type and amputation level. The findings highlight the need to adapt existing evacuation time calculation methods to account for reduced speed and high fatigue (effective distance 50-100 m) in individuals with bilateral lower limb prostheses. The scientific novelty lies in the comprehensive analysis of biomechanical characteristics of bilateral prostheses in the context of evacuation, conducted for the first time in Ukraine with consideration of the war context. Quantitative indicators of speed and energy expenditure provide a basis for updating regulatory standards. The practical value of the study is in supplying data for developing inclusive evacuation strategies that address the needs of individuals with limited mobility, particularly in emergency situations.

УДК 614.841.3

ПОРІВНЯЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЖНАРОДНИХ ТЕХНІЧНИХ ВИМОГ ДО ПОЖЕЖНИХ КРАН-КОМПЛЕКТІВ: СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ УНІФІКАЦІЇ

https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.1.(19).129-141

Коваль Р. Р.[1], ORCID iD 0000-0001-8970-2831
Твердохліб О. С.[1], ORCID iD 0000-0002-1502-2937
Ємельяненко С. О.[2], ORCID iD 0000-0002-2766-8428
Середа Д. В.[1], ORCID iD 0000-0002-9645-5864
Несенюк Л. П.[1], ORCID iD 0000-0002-7796-7952
*E-mail: koval_roman@nuczu.edu.ua

[1]Інститут наукових досліджень з цивільного захисту НУЦЗ України, Україна
[2]Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ
Надійшла до редакції: 30.04.2025
Пройшла рецензування: 15.05.2025

КЛЮЧОВІ СЛОВА:
пожежний кран-комплект, технічні вимоги, пожежна безпека, міжнародні стандарти, будівельні норми, уніфікація т

АНОТАЦІЯ
В статті проведено порівняльне дослідження міжнародних технічних вимог до ПКК. Це дослідження включає аналіз існуючих міжнародних стандартів (таких як NFPA, EN, JIS, GB, IS, AS/NZS) та їх порівняння. Виявлено ключові відмінності у технічних параметрах (довжина, діаметр, матеріали рукавів), робочих та випробувальних тисках, швидкостях потоку води, а також у підходах до проектування, експлуатації та цільового використання ПКК у різних країнах. В результаті дослідження встановлено значні технічні відмінності у вимогах до ПКК між різними країнами світу. Також відзначено розбіжності у діаметрах та довжинах рукавів, типах з'єднань (Storz, NST, JIS, GB, BS 336), матеріалах, а також у практиках обслуговування та сертифікації. Показано, що українська нормативна база поступово адаптується до європейських стандартів, проте комплексний порівняльний аналіз з іншими світовими підходами є недостатнім. Отримані дані корисні, оскільки вони формують основу для розробки пропозицій щодо можливих напрямів уніфікації технічних вимог до ПКК. Вони дозволяють визначити конкретні сфери, де необхідна гармонізація українських стандартів з міжнародними, що сприятиме підвищенню конкурентоспроможності вітчизняного ринку пожежного обладнання, спрощенню міжнародного співробітництва, імпорту сучасних технологій та експорту української продукції. Це також допоможе розробляти ефективніші та безпечніші системи пожежогасіння, адаптовані до сучасних викликів та міжнародних практик.

Постановка проблеми. ПКК є важливими елементами систем протипожежного захисту будівель, що забезпечують доступ до джерела води для локалізації та ліквідації пожежі на ранніх стадіях. Ефективність їх застосування залежить від відповідності конструктивних та експлуатаційних характеристик нормативним вимогам, що визначаються відповідними стандартами [1, 2].

Вони є невід'ємною складовою систем активного пожежогасіння на ранніх стадіях виникнення пожежі, забезпечуючи оперативну подачу води для локалізації та ліквідації загорянь до прибуття професійних пожежних підрозділів. Технічні вимоги, що регламентують конструкцію, матеріали, гідравлічні параметри, а також правила монтажу та обслуговування ПКК відіграють тут ключову роль, формуючи засади

функціонування систем протипожежного захисту [3, 4].

Однак на міжнародному рівні спостерігається значна різноманітність технічних вимог до ПКК, закріплена у національних та регіональних стандартах, таких як EN, ISO, NFPA тощо. Ці відмінності охоплюють як конструктивні елементи (матеріали, діаметри рукавів, типи покриття, комплектація шафи тощо), так і експлуатаційні показники (робочий тиск, витрата води, методи випробувань). Така варіативність створює проблеми сумісності, що ускладнює взаємне визнання сертифікатів відповідності, а також стає бар'єром для імпорту та подальшої експлуатації обладнання в рамках конкретної держави, на територію якої відповідні технічні вимоги поширюються [1, 5].

На сьогодні Україна, яка прагне гармонізувати національну нормативну базу з міжнародними стандартами в межах євроінтеграційних процесів, постає перед низкою викликів, що потенційно можуть їх гальмувати, атому постає завдання аналізу існуючих вимог, виявлення ключових відмінностей та визначення можливих перспектив уніфікації у згаданій сфері діяльності. Недостатня узгодженість нормативних документів може призвести до експлуатаційних ризиків, обмеження вибору обладнання, а також до зниження ефективності систем протипожежного захисту в національному масштабі.

Таким чином, постає наукова проблема, що полягає в необхідності комплексного дослідження міжнародних технічних вимог до ПКК, з'ясування їхніх відмінностей і пошуку перспектив уніфікації для забезпечення відповідності міжнародним стандартам, підвищення ефективності пожежної безпеки та спрощення процедур сертифікації і постачання обладнання.

Саме тому важливим є проведення порівняльного аналізу ключових міжнародних технічних вимог до ПКК, висвітлення сучасного стану стандартизації, ідентифікація основних відмінностей та обґрунтування можливих напрямів їх уніфікації.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Проблема технічного регулювання ПКК активно досліджується як українськими, так і зарубіжними науковцями. Ключовими роботами у згаданому напрямі є дослідження Петухової О.А., Горносталь С.А. та Щербака С.М., де аналізуються гідродинамічні характеристики елементів систем внутрішнього протипожежного водопроводу, а також особливості вибору діаметрів ПКК. Автори підкреслюють важливість забезпечення відповідності національним нормативам та обґрунтовують вибір конструктивних рішень для різних типів об'єктів.

У дослідженнях Адам К. Крістенсен з провідної американської компанії у галузі пожежно-технічного проектування «Jensen Hughes», наводить результати аналізу відмінностей між американськими та європейськими стандартами, зокрема NFPA 14 та EN 671. Показано, що існують значні розбіжності у вимогах до мінімальних витрат води та тиску, а також у підходах до визначення зон покриття та максимальної довжини рукавів. Наприклад, NFPA 14 часто передбачає вищі витрати води тоді як EN 671-1 для ПКК з напівжорстким рукавом може вимагати значно менших витрат. Ці дослідження є надзвичайно цінними для розуміння практичних відмінностей між нормативними документами, проте вони не завжди пропонують конкретні механізми для уніфікації даних стандартів на міжнародному рівні, фокусуючись переважно на їх порівняльному аналізі.

Гільєромно Реїн з Імперського коледжу Лондона у своїх дослідженнях, підіймає питання стандартизації через аналіз ефективності різних систем пожежогасіння. Його дослідження впливу параметрів водяного струменя на придушення полум'я мають пряме відношення до обґрунтування вимог до продуктивності ПКК. Він та його дослідницька група наголошують на

важливості науково обґрунтованого підходу до визначення витрат та тиску, що може слугувати основою для перегляду та гармонізації існуючих нормативів.

Аналіз надійності та практики технічного обслуговування ПКК представлений у роботах Нілса Йохансона та Даніеля Нілсона з Лундського університету. Вони акцентують увагу на тому, що розбіжності у стандартах щодо вимог до частоти та змісту технічного обслуговування ПКК можуть призводити до різного рівня експлуатаційної готовності. Показано, що ефективність ПКК залежить не лише від початкових технічних характеристик, а й від культури обслуговування та навчання персоналу, що також варіюється в різних країнах. Хоча ці дослідження виявляють важливі аспекти надійності, що впливають на ефективність систем, вони не пропонують універсальних рішень для гармонізації міжнародних практик обслуговування.

Дослідники з Науково-дослідного інституту Швеції, такі як Стефан Сардквіст, у дослідженнях аналізують європейські стандарти серії EN 671. Їхні роботи детально розглядають методики випробувань ПКК, включаючи гідравлічні характеристики, міцність компонентів та зручність використання. Дослідження RISE часто використовуються для обґрунтування змін та доповнень до європейських норм, і їхні експерти беруть участь у робочих групах CEN. Вони вказують на те, що хоча серія EN 671 забезпечує певний рівень гармонізації в Європі, відмінності в національних додатках та практиках впровадження все ще існують. Це є показником того, що навіть у межах одного економічного простору повна уніфікація стикається з труднощами.

В. К. Чоу з Гонконгського політехнічного університету проводить дослідження щодо порівняльного аналізу стандартів пожежної безпеки, що застосовуються в з іншими міжнародними стандартами, включаючи американські та китайські. Його роботи висвітлюють конкретні розбіжності, наприклад, у вимогах до відстаней між ПКК, необхідності забезпечення певних рівнів тиску на найбільш віддаленому крані, та підходах до класифікації пожежної небезпеки об'єктів. Chow підкреслює, що пряме перенесення норм з однієї країни в іншу без урахування місцевих умов будівництва та культури безпеки є неефективним. Це вказує на те, що принципова неможливість повної уніфікації може бути обумовлена глибокими відмінностями у культурних та будівельних традиціях.

Попри наявність окремих досліджень, комплексного аналізу відмінностей між міжнародними стандартами, що враховував би як технічні, так і експлуатаційні аспекти застосування ПКК, на сьогодні бракує. Це обумовлює актуальність подальших досліджень щодо пошуку напрямів уніфікації технічних вимог з урахуванням міжнародного досвіду та національних особливостей.

Формулювання цілей дослідження. Метою дослідження є проведення комплексного порівняльного аналізу міжнародних технічних вимог до ПКК, визначення основних відмінностей між національними та міжнародними стандартами, а також обґрунтування шляхів їхньої гармонізації та напрямів уніфікації для забезпечення ефективності та сумісності обладнання у системах протипожежного захисту.

Для досягнення цієї мети поставлено такі завдання:

– проаналізувати основні положення міжнародних стандартів країн Європи, США, Канади та країн Азії щодо технічних характеристик ПКК;

– порівняти вимоги міжнародних стандартів з чинними національними нормативними актами та стандартами;

– визначити основні технічні, конструктивні та експлуатаційні відмінності у вимогах до ПКК;

– запропонувати рекомендації щодо уніфікації технічних вимог на основі міжнародного досвіду та національних особливостей.

Методи дослідження. У дослідженні використано комплекс методів, що забезпечили досягнення поставленої мети та завдань:

– аналітичний метод – для вивчення та систематизації положень міжнародних і національних стандартів, нормативних актів, що регламентують технічні вимоги до ПКК;

– компаративний метод – для виявлення відмінностей між вимогами міжнародних та українських стандартів щодо конструкції, технічних характеристик, випробувань та експлуатаційних умов ПКК;

– системно-структурний підхід – для встановлення взаємозв'язків між технічними параметрами ПКК та їхнім впливом на ефективність роботи систем внутрішнього протипожежного водопроводу;

– методи узагальнення та екстраполяції – для формування висновків та рекомендацій щодо гармонізації та уніфікації технічних вимог ПКК.

Виклад основного матеріалу. ПКК відіграють важливу роль у забезпеченні пожежної безпеки будівель та споруд. Їх конструкція, технічні характеристики та вимоги до встановлення регламентуються міжнародними та національними стандартами. Аналіз міжнародних стандартів засвідчує, що вони мають багато спільних вимог до ПКК. Однак існують також певні відмінності, які необхідно враховувати при проектуванні, монтажі та експлуатації вказаних систем [6, 7]. У цьому дослідженні нами розглядаються ключові світові вимоги до ПКК, зокрема нормативи країн Європи, США та країн Азії .

Аналіз стандартів показує такі ключові розбіжності:

– підхід до використання: європейські стандарти часто орієнтовані на використання ПКК будь-якою особою, яка виявила пожежу, тому акцент робиться на простоті використання, напівжорстких рукавах, що не потребують повного розмотування [8, 9]. Системи за NFPA можуть передбачати використання підготовленим персоналом або пожежними, що допускає більші діаметри рукавів та вищі витрати;

– вимоги до гідравлічних параметрів: мінімальні витрати води та тиск можуть значно відрізнятися, що відображає різні підходи до оцінки необхідної інтенсивності подачі вогнегасної речовини ;

– конструктивні особливості: типи з'єднувальних головок є яскравим прикладом регіональних відмінностей, що ускладнює взаємозамінність;

– процедури сертифікації та випробувань: методики випробувань та критерії відповідності можуть відрізнятися, що ускладнює взаємне визнання результатів [10, 11].

З огляду на різноманіття національних та регіональних технічних вимог можемо виокремити основні причини відмінностей, а саме:

– історичний розвиток, адже національні системи пожежогасіння формувалися незалежно та до певної міри відокремлено протягом десятиліть;

– кліматичні умови та типові ризики, притаманні відповідним територіям, впливають на вибір матеріалів, з яких виготовляються ПКК, а також на їхні конструктивні особливості;

– економічні фактори (вплив місцевих виробників та їхніх виробничих потужностей, вартість впровадження тих чи інших рішень, доцільність та економічна обґрунтованість, кон'юнктура ринку).

Так, в Україні, Франції та Німеччині застосовуються стандарти на основі європейських нормативів (EN 671, EN 694, EN 14540), що передбачають використання рукавів діаметром 25 або 33 мм, довжиною 20-30 м, з випробувальним тиском 1,2–1,6 МПа. З'єднання виконуються за системою Storz, рукави зберігаються намотаними на котушках, призначені для первинного використання підготовленим персоналом або мешканцями будівлі [10, 12].

Європейські нормативи:

– конкретизують технічні характеристики та випробувальні методи

для напівжорстких пожежних рукавів, інтегрованих у стаціонарні системи пожежогасіння, включаючи параметри міцності, стійкості до тиску та діаметрів [13, 14];

– регламентують експлуатаційні та конструктивні вимоги до плоскоскладаних пожежних рукавів з водонепроникним внутрішнім покриттям, призначених для застосування у стаціонарних протипожежних установках, забезпечуючи їх ефективність та довговічність [14];

– визначають методи випробування рукавів , включаючи перевірку робочого тиску, стійкості до стирання, гнучкості при низьких температурах та адгезії покриття, що є критично важливим для забезпечення їхньої надійності [15].

– встановлюють фундаментальні технічні принципи та термінологію у сфері пожежної безпеки, охоплюючи класифікацію пожеж, вимоги до вогнестійкості будівельних конструкцій та шляхів евакуації, що є основою для проектування систем протипожежного захисту [16, 17];

– формулюють технічні аспекти побудови та функціонування системи управління пожежною безпекою об'єкта захисту, включаючи документування процедур, моніторинг стану протипожежного обладнання та організацію технічного обслуговування [17].

У США астосовується система стандартів NFPA (зокрема, NFPA 14, NFPA 1961, NFPA 1962), що встановлює два основних діаметри рукавів – 38 мм (1,5 дюйма) та 65 мм (2,5 дюйма) довжиною 30 м. Випробувальний тиск становить 2,75 МПа, з’єднання виконуються за системою NST. Системи розраховані переважно для використання професійними пожежними, хоча рукави діаметром 38 мм допускаються для використання підготовленим персоналом [18].

США використовують вищі робочі та випробувальні тиски, ніж країни ЄС чи Азії. Системи розраховані на професійне використання, а для цивільного населення ПКК застосовуються обмежено (переважно тільки 38 мм і лише в будівлях з відповідними системами). В США застосовується універсальна система з’єднань (NST), однак вона не сумісна з європейськими стандартами (DIN, Storz, JIS, GB). Всі рукави ПКК мають сертифікацію UL (Underwriters Laboratories) або FM Approved.[19, 21].

У Канаді використовуються стандарти NFPA та місцеві нормативи ULC, що подібні до американських вимог. Рукави мають діаметр 38 мм та 65 мм, довжину 30 м, випробувальний тиск 2,75 МПа. З’єднання – NST або CSA B62. Рукави зберігаються на котушках (для населення) або складеними в шафах (для пожежних) [18, 21].

Натомість в Японії діють стандарти JIS B9911, JIS B9921. Рукави мають діаметр 40 мм або 65 мм, довжину 20-30 м, випробувальний тиск 1,6-2,0 МПа. З’єднання – JIS типу. Рукави зберігаються намотаними на котушках або складеними в шафах. Використання допускається як населенням, так і пожежними командами залежно від класу будівлі [22, 23].

У Китаї діють стандарти GB 6246, GB 3445 і рукави ПКК мають такі технічні характеристики: діаметр рукава – 25, 40 або 65 мм; довжина – 20-30 м, випробувальний тиск – 2,0 МПа, з’єднання – відповідно до китайського стандарту GB, сумісний з японськими JIS. Рукави зберігаються як на котушках, так і в шафах. Використання – для пожежних і підготовленого персоналу. Передбачено вимоги щодо стійкості до високих температур (≥100°C) (важливо для промислових об'єктів). Обов’язковий захист від ультрафіолету (зовнішнє встановлення). Додаткові випробування на герметичність під робочим тиском.Часто використовуються комбіновані шафи (ПКК та вогнегасник в одному модулі) [22].

В Індії застосовуються стандарти IS 884:1985, IS 636:2018 та вимоги Національного будівельного кодексу.

Австралія керується стандартами AS 1221, AS/NZS 2441. Рукави мають діаметр 19-25 мм (напівжорсткі) або 38 мм

(гнучкі), довжину 36 м. Випробувальний тиск – 1,5-2,0 МПа. З'єднання – Storz. Використання допускається як підготовленим персоналом, так і пожежними [24].

Таблиця 1 – Порівняння систем ПКК в різних країнах світу

Країна	Переваги	Недоліки
Україна	Адаптація до вимог ЄС (EN 671-1), що полегшує імпорт та експорт устаткування. Сумісність з європейською системою з'єднань Storz, що забезпечує ефективну взаємодію з партнерами в ЄС. Використання стандартизованих рукавів і вентилів сприяє уніфікації технічного обслуговування.	Національні стандарти не завжди оновлюються синхронно з міжнародними змінами, що ускладнює уніфікацію. Відсутність контролю якості на всіх етапах виготовлення обладнання в окремих виробників. Брак державних програм з модернізації наявних ПКК.
Франція	Широке впровадження систем за стандартом EN 671.Високі стандарти якості та регулярна сертифікація обладнання. Розвинена система технічного супроводу та навчання персоналу щодо використання ПКК.	Висока вартість технічного обслуговування обладнання. Складність адаптації національних норм під потреби об'єктів зі специфічним призначенням.
Німеччина	Чітка система стандартів (DIN), яка включає вимоги до матеріалів, тиску та монтажних робіт. Великий вибір обладнання від різних сертифікованих виробників.	Потреба в ретельному технічному обслуговуванні згідно з жорсткими стандартами. Висока ціна ПКК порівняно з іншими країнами.
Велика Британія	Орієнтація на зручність використання населенням. Компактність обладнання (легкі котушки та рукави) підходить для житлових і комерційних об'єктів. Сувора нормативна база (BSI) з регулярним оновленням.	Несумісність з європейськими або американськими стандартами без адаптерів. Висока залежність від національного виробника після Brexit.
США	Використання надійних систем високого тиску (NFPA 14, NFPA 1962, OSHA).Значний діаметр рукавів забезпечує великий обсяг подачі води. Добре розвинена база для сертифікації та обслуговування обладнання.	Високий тиск у системах потребує спеціального навчання персоналу. Незручність застосування для цивільного населення без попередньої підготовки. Складність інтеграції зі стандартами інших країн (Storz чи BS).
Японія	Суворе дотримання стандартів пожежної безпеки (JIS – Japanese Industrial Standards). Високий рівень автоматизації та інтеграції з системами пожежогасіння. Компактне та ефективне обладнання, пристосоване до умов щільної забудови.	Складна система сертифікації для імпортного обладнання. Висока вартість технологічних рішень та обслуговування. Обмежена сумісність із європейськими та американськими з'єднаннями без адаптерів.
Китай	Широкий вибір локального обладнання за доступною ціною. Наявність національних стандартів (GB), що враховують місцеву специфіку. Підтримка державних програм з оновлення систем пожежогасіння.	Різнорідність стандартів у регіонах країни. Наявність великої кількості несертифікованого або неякісного обладнання. Недостатня сумісність з обладнанням країн ЄС та США без адаптації.
Індія	Використання власних національних стандартів IS (Indian Standards), адаптованих під місцеві умови. Широка наявність обладнання вітчизняного виробництва. Активне просування законодавчих ініціатив у сфері пожежної безпеки.	Низький рівень контролю якості в деяких сегментах виробництва. Великий розрив між стандартами міст і сільських районів. Проблеми уніфікації з міжнародними системами.

Особливостями тут є високий випробувальний тиск (2,3 МПа) через змінні умови водопостачання та високий ризик пошкодження. Використовується британська система з'єднань (BS 336) та передбачена часткова сумісність з іншими країнами британської школи стандартів (Великобританія, країни Британської Співдружності). Системи мають бути перевірені кожні 6 місяців згідно з NBC. Обов'язкова наявність табличок англійською та місцевими мовами на шафах [25, 26].

Напівжорсткі рукави зберігаються намотаними на котушках, а гнучкі – у шафах. Напівжорсткі системи доступні для населення, плоскоскладані – тільки для пожежних.Проведений порівняльний аналіз технічних вимог до ПКК у різних країнах (Україна, країни ЄС, США, Велика Британія, Японія, Китай, Індія) засвідчив як наявність спільних елементів у підходах до пожежної безпеки, так і суттєві відмінності, зумовлені технічними особливостями, різною нормативною базою, економічними, екологічними чинниками, особливостями забудови тощо.

У країнах ЄС, таких як Франція та Німеччина, домінують положення стандартів EN 671, що забезпечує високу уніфікацію, якість і безпечність продукції. Україна, прагнучи інтегруватися до європейського ринку, поступово гармонізує своє законодавство відповідно до цих вимог, однак ще має низку структурних та інституційних бар'єрів щодо впровадження повної відповідності.

США демонструють інший підхід, орієнтований на потужні, професійні системи пожежогасіння, регламентовані NFPA (National Fire Protection Association) та OSHA (Occupational Safety and Health Administration). Вони менш адаптовані до користувачів без спеціальної підготовки, проте надзвичайно ефективні на об'єктах з високими вимогами до водоподачі. Водночас система з'єднань типу NST у США суттєво відрізняється від європейських стандартів, що ускладнює технічну сумісність ПКК.

Велика Британія, що використовує стандарти BSI (British Standards Institution), тривалий час дотримувалась європейських норм, однак після Brexit спостерігається відхід у бік національних рішень, що створює нові виклики для міжнародної інтеграції.

У країнах Азії спостерігається висока варіативність стандартів. Японія вирізняється високою технологічністю та компактністю рішень, натомість Китай та Індія мають великі внутрішні ринки, що дозволяє розвивати власні стандарти, але ці ринки часто страждають від нерівномірної якості продукції. Усі три країни обмежено інтегровані в західну систему стандартів, тому для ефективної міждержавної співпраці потрібні адаптери або модернізовані вироби.

Аналізуючи Австралію, до порівняння, можна констатувати, що її системи ПКК є високотехнологічними, адаптованими до умов цього континенту**,** проте досить вузько спеціалізованими та частково ізольованими в контексті глобальної інтеграції. Незважаючи на сумісність із частиною європейських елементів, система з'єднань є іншою, що ускладнює імпорт та експорт без спеціальних рішень.

Загалом можемо підсумувати, що переваги європейської системи полягають у гармонізації та відкритості ринку, американської – у професіоналізмі, азійських – у пристосуванні до національних умов та масовому виробництві.

Широка варіація технічних специфікацій (довжина, діаметр, тиск, типи з'єднань) у різних стандартах безпосередньо призводить до значних виробничих та логістичних викликів для глобальних виробників. Це вимагає розробки регіонально-специфічних ліній продуктів, збільшує виробничі витрати та, зрештою, впливає на доступність та глобальну поширеність основного обладнання для потреб систем протипожежного захисту.

Детальне порівняння даних виявляє широкий спектр технічних специфікацій

для ПКК. Наприклад, довжина рукавів варіюється від 18,3 м до 35 м, діаметри від 12 мм до 3 дюймів, робочий тиск від 7 до 16 бар, а випробувальний тиск від 12 бар до 300 фунтів на квадратний дюйм. Найважливіше, що існує кілька несумісних типів з'єднань (Storz, NH/NST, British Instantaneous, Guilliemin), з наявністю навіть підваріацій.

Така різноманітність означає, що єдиний «універсальний» ПКК не може бути виготовлений та використовуватися по всьому світу без суттєвих модифікацій для кожного цільового ринку.

Виробники повинні інвестувати в різноманітні дослідження та розробки, підтримувати кілька виробничих ліній або інструментів для різних компонентів, керувати складними запасами регіонально-специфічних деталей та нести вищі витрати на сертифікацію в кожній країні. Це призводить до менш ефективного та дорожчого глобального ланцюга поставок обладнання для потреб систем протипожежного захисту. Прямим наслідком таких виробничих та логістичних складнощів є збільшення загальних витрат на кінцеву продукцію. Витрати можуть негативно вплинути на доступність та широке впровадження основного обладнання для забезпечення пожежної безпеки, особливо в країнах, що розвиваються, де бюджетні обмеження є значними. Крім того, відсутність взаємодії між різними типами з'єднань становить критичний ризик безпеки під час міжнародних операцій з ліквідації наслідків стихійних лих (до прикладу, в рамках Механізму цивільного захисту ЄС). Така несумісність вимагає використання різних адаптерів, що може спричинити затримки в процесах ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій та потенційно призвести до катастрофічних наслідків. Це підкреслює, що перелічені технічні відмінності є не просто незначною незручністю, а фундаментальним бар'єром для досягнення глобальної пожежної безпеки.

Такий висновок може бути основою для рекомендацій органам стандартизації, виробникам і проектним організаціям щодо подальшого вдосконалення ПКК у глобальному контексті.

З метою систематизації результатів розглянемо технічні відмінності рукавів (довжина, діаметр, матеріали, параметри тиску, швидкості потоку води).

1. Довжина: китайські стандарти зазвичай вимагають мінімальної довжини 20 метрів і досягають 30 метрів [22].

У Великобританії довжина рукавів варіюється, включаючи 18,3 м для 22-міліметрових рукавів високого тиску та 23 м для 45-міліметрових й 70-міліметрових рукавів. Для штурмових рукавів поширені довжини 50 та 100 футів (приблизно 15,24 м та 30,48 м) [27, 28].

Загалом, довжина рукавів може варіюватися залежно від конкретних вимог до встановлення, причому деякі досягають 35 метрів.

2. Діаметр: китайські стандарти вказують мінімальний діаметр не менше 19 мм та діаметр труби 1 дюйм (25,4 мм) [22].

У всьому світі поширені діаметри варіюються від 19 мм (¾ дюйма) до 25 мм (1 дюйм).

Великобританія використовує ширший діапазон, включаючи 22-, 45- та 70-міліметрові рукави, а також спеціалізовані 12-міліметрові рукави. Для висотних будівель перевага надається рукавам 45-70 мм. 45-міліметрові рукави зазвичай використовуються всередині будівель, а 64-міліметрові (часто згадуються як 70-міліметрові) рукави є основою для пожежних служб Великобританії завдяки чудовим характеристикам подачі потоку [27, 28].

3. Матеріали: рукави ПКК зазвичай виготовляються з гуми або синтетичних матеріалів. Китайські стандарти передбачають гумову підкладку, ПВХ або ПУ матеріали [22].

Британський стандарт BS 6391 Тип 3 визначає ткану поліефірну оболонку рукава та гумову внутрішню підкладку з нітрилу. Оболонка рукава також може мати поліефірну основу та поліамідний утоковий матеріал [27, 28].

Правила OSHA у США вимагають облицьованих рукавів для систем, встановлених після 1 січня 1981 року, при цьому необлицьовані рукави на існуючих системах повинні бути замінені на облицьовані, коли вони стануть непридатними.

Вимоги до потоку води та тиску.

4. Робочий тиск: китайські стандарти визначають робочий тиск від 0,7 МПа (7 бар) до 8, 10, 13 або 16 бар.

Британський стандарт BS 6391 Тип 3 визначає максимальний робочий тиск 15 бар з варіаціями для різних діаметрів: 15 бар для 38–76 мм та 12 бар для 89 мм [27, 28].

EN 671-1 визначає максимальний робочий тиск 12 бар [10].

Правила OSHA встановлюють динамічний тиск на насадці в діапазоні від 30 фунтів на квадратний дюйм (210 кПа) до 125 фунтів на квадратний дюйм (860 кПа).

5. Випробувальний тиск: китайські стандарти включають випробувальний тиск 12, 15, 20 або 24 бар.

У Великобританії типовий випробувальний тиск становить 18 бар [27, 28]. EN 671-1 визначає випробувальний тиск на рівні 18 бар.

NFPA зазвичай встановлює вимоги до випробування рукавів при 300 фунтах на квадратний дюйм (20,7 бар) та подавальних рукавів при 200 фунтах на квадратний дюйм (13,8 бар), при цьому тиск підтримується протягом 3 хвилин [18, 19].

6. Тиск розриву: китайські стандарти перераховують тиск розриву 24, 30, 39 або 48 бар.

Британський стандарт BS 6391 Тип 3 визначає середній тиск розриву 45 бар або 50 бар [27, 28].

7. Швидкість потоку: китайські стандарти вимагають пропускної здатності насадки не менше 0,45 літрів на секунду; при цьому щорічні випробування потоку забезпечують мінімальний витік 0,4 л/с [22].

NFPA 14 визначає мінімальні витрати на лінію (наприклад, 100 галонів на хвилину або 6,3 л/с) та загальні витрати системи (300-500 галонів на хвилину залежно від заповнюваності). Перший стояк повинен забезпечувати потік 500 галонів на хвилину; при цьому додаткові стояки забезпечують додаткові 250 галонів на хвилину.

Стандарти ISO передбачають необхідність достатнього тиску та швидкості потоку для ефективного пожежогасіння.

Висновки та напрями подальших дослыджень. Відмінності у стандартах створюють бар'єри для міжнародної співпраці, ускладнюють проектування об'єктів для міжнародних компаній та можуть призводити до різного рівня пожежної захищеності. Уніфікація технічних вимог до ПКК є перспективною метою, хоча й складною через усталені практики та різні підходи.

Провівши дослідження міжнародних нормативів щодо ПКК, нами визначено такі ймовірні перспективи їх подальшої уніфікації:

1. На основі стандартів ISO. ISO як глобальна організація може відігравати ключову роль у розробці єдиних міжнародних стандартів ПКК. Подальша уніфікація національних та регіональних стандартів (таких як EN та NFPA) з нормами ISO може стати основою для взаємного міжнародного визнання. Це може підвищити глобальний рівень пожежної безпеки та сприятиме ефективній міжнародній співпраці пожежних служб під час ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, забезпечуючи уніфікований і високий стандарт якості та надійності.

2. Визнання результатів випробувань та сертифікації. Укладання угод про взаємне визнання між країнами та регіонами для сертифікації протипожежного обладнання може спростити доступ продукції на різні ринки, навіть за наявності певних відмінностей та особливостей у стандартах, за умови доведення еквівалентного рівня безпеки, що може бути підтверджено шляхом здійснення порівняльного аналізу

стандартів та випробувань. Зазначене значно зменшить фінансові та часові витрати виробників на повторну сертифікацію, сприятиме інноваціям, стимулюватиме конкуренцію та, зрештою, спроможне підвищити загальний рівень пожежної безпеки шляхом поширення передових технологій та обладнання.

3. Розробка стандартів, заснованих на експлуатаційних характеристиках (Performance-Based Standards), зокрема відхід від жорстко регламентованих конструктивних вимог (наприклад, гарантований час роботи, площа покриття, ефективність гасіння для певного класу пожежі). Такий підхід дозволяє враховувати специфічні умови експлуатації та новітні технології, стимулюючи розроблення більш досконалих систем протипожежного захисту. Водночас, він гарантує досягнення необхідного та науково обґрунтованого рівня безпеки, оскільки фокус зміщується на фактичну результативність, а не на відповідність застарілим чи обмеженим проектним параметрам. Це сприяє швидшому впровадженню передових практик та більш адаптивним рішенням у відповідь на еволюцію пожежних ризиків.

4. Обмін інформацією та найкращими практиками шляхом створення міжнародних платформ для обміну досвідом, результатами досліджень у сфері проектування, експлуатації та обслуговування ПКК. Це може сприяти поступовому зближенню підходів та виявленню оптимальних рішень, забезпечити кумулятивний розвиток знань, дозволяючи уникнути дублювання зусиль, швидко адаптувати успішні стратегії та технології, а також виявляти та усувати спільні виклики. Така синергія експертизи є критично важливою для постійного підвищення ефективності та надійності систем ПКК на глобальному рівні.

5. Акцент на ключові параметри безпеки, адже при уніфікації першочергову увагу слід приділяти тим параметрам, які безпосередньо впливають на безпеку та ефективність ПКК (надійність спрацювання, достатність подачі води, міцність компонентів, зрозумілість інструкцій). Така сфокусована стандартизація гарантує, що міжнародні норми забезпечуватимуть не просто сумісність, а безкомпромісний рівень функціональної пожежної безпеки, дозволяючи оперативно та ефективно реагувати на загрози, незалежно від регіональних відмінностей у матеріалах чи конструкціях задля покращення глобальної стійкості.

6. Участь усіх зацікавлених сторін, бо процес уніфікації має залучати виробників, проектантів, науковців, органи сертифікації та нагляду з різних країн для вироблення консенсусних рішень. Ініціативи, подібні до «European Fire Safety Action Plan» або «International Fire Safety Standards Coalition (IFSS)», що прагнуть до глобального узгодження принципів пожежної безпеки, можуть стати каталізаторами і для інших стандартів. Без всебічного залучення ключових стейкхолдерів ризик створення неефективних або неприйнятних стандартів значно зростає, підриваючи саму мету уніфікації.

Таким чином, порівняльний аналіз міжнародних технічних вимог до ПКК виявляє істотні відмінності в підходах до стандартизації, що зумовлені комплексом історичних, технічних та економічних факторів. Ці розбіжності створюють певні перешкоди для глобального ринку та можуть впливати на ефективність систем пожежогасіння.

Незважаючи на складнощі, уніфікація міжнародних вимог є стратегічно важливим завданням. Пріоритетними напрямками можуть стати розробка глобальних стандартів ISO, що базуються на експлуатаційних характеристиках, гармонізація існуючих регіональних стандартів з урахуванням кращих практик, а також сприяння взаємному визнанню результатів сертифікації.

Подальші дослідження за вказаним напрямом повинні бути спрямовані на детальний кількісний та якісний аналіз

конкретних положень стандартів, оцінку економічного ефекту від уніфікації та розробку дорожньої карти для поступового зближення міжнародних технічних вимог до ПКК. Це сприятиме не лише підвищенню рівня пожежної безпеки у світовому масштабі, але й стимулюватиме інновації та розвиток ринку протипожежного обладнання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Петухова О. А., Горносталь С. А., Щербак С. М. Обґрунтування вибору характеристик складових пожежного кран-комплекту. *Проблеми пожежної безпеки*. 2017. Вип. 42. С. 95–100.
2. Петухова О. А., Щербак С. М. Визначення втрат напору плоскозгорнутих рукавів, якими комплектуються пожежні кран-комплекти. *Проблеми пожежної безпеки*. 2016. Вип. 39. С. 196–200.
3. Петухова О. А., Горносталь С. А., Шаповалова О. О., Щербак С. М. Дослідження фактичних витрат води з пожежних кран-комплектів. *Проблеми пожежної безпеки*. 2016. Вип. 39. С. 190–195.
4. Петухова О. А., Білаш Є. А., Швед А. В. Розрахунок кількості пожежних кран-комплектів як напрямок покращення протипожежного захисту будівлі. Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення : зб. тез доповідей Міжнар. наук.-практ. конф. (13 гру. 2024 р., м. Львів). Львів : ЛДУБЖД, 2024. С. 111.
5. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об’єктів будівництва. Загальні вимоги. Київ : Мінрегіонбуд України, 2016. 75 с.
6. ДБН В.2.2-9:2018. Громадські будинки та споруди. Основні положення. Київ : Мінрегіонбуд України, 2018. 88 с.
7. ДБН В.2.5-56:2014. Системи протипожежного захисту. Київ : Мінрегіонбуд України, 2014. 69 с.
8. ДБН В.2.5-64:2012. Внутрішній водопровід та каналізація. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. Київ : Мінрегіонбуд України, 2012. 112 с.
9. ДСТУ EN 12845:2016. Стаціонарні системи пожежогасіння. Автоматичні спринклерні системи. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 112 с.
10. ДСТУ EN 671-1:2017. Стаціонарні системи пожежогасіння. Кран-комплекти пожежні. Частина 1. Кран-комплекти з напівжорсткими рукавами. Загальні вимоги. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. 45 с.
11. ДСТУ EN 671-2:2017. Стаціонарні системи пожежогасіння. Кран-комплекти пожежні. Частина 2. Кран-комплекти з плоскоскладаними рукавами. Загальні вимоги. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. 41 с.
12. ДСТУ EN 671-3:2017. Стаціонарні системи пожежогасіння. Кран-комплекти пожежні. Частина 3. Технічне обслуговування кран-комплектів з напівжорсткими і плоскоскладаними рукавами. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. 33 с.
13. ДСТУ EN 694:2019. Рукава пожежні. Напівжорсткі рукави для стаціонарних систем пожежогасіння. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 58 с.
14. ДСТУ EN 14540:2019. Рукави пожежні. Плоскоскладані рукави, що не просочуються для стаціонарних систем пожежогасіння. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 51 с.
15. ДСТУ EN 15889:2017. Пожежні рукави. Методи випробування. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. 43 с.
16. ДСТУ 8828:2019. Пожежна безпека. Загальні положення. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020. 87 с.
17. ДСТУ 8965:2019. Система управління пожежною безпекою об’єкта захисту. Загальні положення. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2021. 31 с.
18. NFPA 14. Standard for the Installation of Standpipe and Hose Systems. Quincy, MA: National Fire Protection Association, 2024. 78 p.
19. NFPA 1961. Standard on Fire Hose. Quincy, MA : National Fire Protection Association, 2020. 43 p.
20. NFPA 1962. Standard for the Care, Use, Inspection, Service Testing, and Replacement of Fire Hose, Couplings, Nozzles, and Fire Hose Appliances. Quincy, MA : National Fire Protection Association, 2018. 59 p.
21. NFPA 14:2019. Standard for the Installation of Standpipe and Hose Systems. Quincy, MA : National Fire Protection Association, 2019. 66 p.
22. GB 50974-2014. Technical Code for Fire Protection Water Supply and Hydrant Systems. Beijing : Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, 2014. 74 p.
23. JIS B 9911:1968. Dimensions of Insert Type Couplings for Fire Hose. Tokyo : Japanese Standards Association, 1968. 5 p.
24. AS 2441:2005. Installation of Fire Hose Reels. Sydney : Standards Australia, 2005. 25 p.
25. IS 884:1985. Specification for First-Aid Hose-Reel for Fire Fighting (First Revision). New Delhi : Bureau of Indian Standards, 1985. 9 p.
26. IS 3844:1989. Code of Practice for Installation and Maintenance of Internal Fire Hydrants and Hose Reels on Premises. New Delhi : Bureau of Indian Standards, 1989. 33 p.
27. British Standards Institution. BS 5306-1:2006. Code of practice for fire extinguishing installations and equipment on premises. Part 1: Hose reels and foam inlets. London : BSI, 2006. 28 p.
28. British Standards Institution. BS 6391:2009. Specification for non-percolating layflat delivery hoses and hose assemblies for fire fighting purposes. London: BSI, 2009. 28 p.

REFERENCES

1. Petukhova, O. A., Hornostal, S. A. & Shcherbak, S. M. (2017). Obgruntuvannia vyboru kharakterystyk skladovykh pozhezhnoho kran-komplektu [Rationale for choosing the characteristics of hose systems’ components]. *Problemy pozhezhnoi bezpeky*, 42, 95–100 [in Ukrainian].

2. Petukhova, O. A. & Shcherbak, S. M. (2016). Vyznachennia vtrat naporu ploskozghornutykh rukaviv, yakymy komplektuiutsia pozhezhni kran-komplekty [Determination of the pressure loss of lay-flat hosewith, with which are equipped hose systems]. *Problemy pozhezhnoi bezpeky*, 39, 196–200 [in Ukrainian].
3. Petukhova, O. A., Hornostal, S. A., Shapovalova, O. O. & Shcherbak, S. M. (2016). Doslidzhennia faktychnykh vytrat vody z pozhezhnykh kran-komplektiv [Study of actual water consumption from hose systems]. *Problemy pozhezhnoi bezpeky*, 39, 190–195 [in Ukrainian].
4. Petukhova, O. A., Bilash, Ye. A. & Shved, A. V. (2024). Rozrakhunok kilkosti pozhezhnykh kran-komplektiv yak napriamok pokrashchennia protypozhezhnoho zakhystu budivli [Calculation of the number of hose systems as a way to improve the fire protection of a building], *Aktualni problemy pozhezhnoi bezpeky ta zapobihannia nadzvychainym sytuatsiiam v umovakh sohodennia* : zb. tez dopovidei Mizhnar. nauk.-prakt. konf. [Actual problems of fire safety and prevention of emergencies in present conditions : proceedings of the International scientific and practical conference]. Lviv [in Ukrainian].
5. *Pozhezhna bezpeka obiektiv budivnytstva. Zahalni vymohy* [Fire safety of building facilities. General requirements] (2016). DBN V.1.1-7:2016. Kyiv : Minrehionbud Ukrainy [in Ukrainian].
6. *Hromadski budynky ta sporudy. Osnovni polozhennia* [Public buildings and structures. Main provisions] (2018). DBN V.2.2-9:2018. Kyiv : Minrehionbud Ukrainy [in Ukrainian].
7. *Systemy protypozhezhnoho zakhystu* [Fire protection systems] (2014). DBN V.2.5-56:2014. Kyiv : Minrehionbud Ukrainy [in Ukrainian].
8. *Vnutrishnii vodoprovid ta kanalizatsiia. Chastyna I. Proektuvannia. Chastyna II. Budivnytstvo* [Internal water supply and sewerage. Part I. Projecting. Part II. Building] (2012). DBN V.2.5-64:2012. Kyiv : Minrehionbud Ukrainy [in Ukrainian].
9. *Statsionarni systemy pozhezhohasinnia. Avtomatychni sprynklerni systemy* [Fixed firefighting systems. Automatic sprinkler systems] (2016). DSTU EN 12845:2016. Kyiv : DP «UkrNDNTs» [in Ukrainian].
10. *Statsionarni systemy pozhezhohasinnia. Kran-komplekty pozhezhni. Chastyna 1. Kran-komplekty z napivzhorstkymy rukavamy. Zahalni vymohy* [Fixed firefighting systems. Hose systems. Part 1. Hose systems with semi-rigid hose. General requirements] (2017). DSTU EN 671-1:2017. Kyiv : DP «UkrNDNTs» [in Ukrainian].
11. *Statsionarni systemy pozhezhohasinnia. Kran-komplekty pozhezhni. Chastyna 2. Kran-komplekty z ploskoskladanymy rukavamy. Zahalni vymohy* [Fixed firefighting systems. Hose systems. Part 2. Hose systems with lay-flat hosewith. General requirements] (2017). DSTU EN 671-2:2017. Kyiv : DP «UkrNDNTs» [in Ukrainian].
12. *Statsionarni systemy pozhezhohasinnia. Kran-komplekty pozhezhni. Chastyna 3. Tekhnichne obsluhovuvannia kran-komplektiv z napivzhorstkymy i ploskoskladanymy rukavamy* [Fixed firefighting systems. Hose systems. Part 3. Maintenance of hose systems with semi-rigid and lay-flat hoses] (2017). DSTU EN 671-3:2017. Kyiv : DP «UkrNDNTs» [in Ukrainian].
13. *Rukava pozhezhni. Napivzhorstki rukavy dlia statsionarnykh system pozhezhohasinnia* [Fire-fighting hoses. Semi-rigid hoses for fixed systems] (2019). DSTU EN 694:2019. Kyiv : DP «UkrNDNTs» [in Ukrainian].
14. *Rukavy pozhezhni. Ploskoskladani rukavy, shcho ne prosochuiutsia dlia statsionarnykh system pozhezhohasinnia* [Fire-fighting hoses. Non-percolating layflat hoses for fixed systems] (2019). DSTU EN 14540:2019. Kyiv : DP «UkrNDNTs» [in Ukrainian].
15. *Pozhezhni rukavy. Metody vyprobuvannia* [Fire-fighting hoses. Test methods] (2017). DSTU EN 15889:2017. Kyiv : DP «UkrNDNTs» [in Ukrainian].
16. *Pozhezhna bezpeka. Zahalni polozhennia* [Fire safety. General provisions] (2020). DSTU 8828:2019. Kyiv : DP «UkrNDNTs» [in Ukrainian].
17. *Systema upravlinnia pozhezhnoiu bezpekoiu obiekta zakhystu. Zahalni polozhennia* [Fire safety management system of the protection object. General provisions] (2021). DSTU 8965:2019. Kyiv : DP «UkrNDNTs» [in Ukrainian].
18. *Standard for the Installation of Standpipe and Hose Systems* (2024). NFPA 14. Quincy, MA : National Fire Protection Association.
19. *Standard on Fire Hose* (2020). NFPA 1961. Quincy, MA : National Fire Protection Association.
20. *Standard for the Care, Use, Inspection, Service Testing, and Replacement of Fire Hose, Couplings, Nozzles, and Fire Hose Appliances* (2018). NFPA 1962. Quincy, MA : National Fire Protection Association.
21. *Standard for the Installation of Standpipe and Hose Systems* (2019). NFPA 14:2019. Quincy, MA : National Fire Protection Association.
22. *Technical Code for Fire Protection Water Supply and Hydrant Systems* (2014). GB 50974-2014. Beijing : Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China.
23. *Dimensions of Insert Type Couplings for Fire Hose* (1968). JIS B 9911:1968. Tokyo : Japanese Standards Association.
24. *Installation of Fire Hose Reels* (2005). AS 2441:2005. Sydney : Standards Australia.
25. *Specification for First-Aid Hose-Reel for Fire Fighting (First Revision)* (1985). IS 884:1985. New Delhi : Bureau of Indian Standards.
26. *Code of Practice for Installation and Maintenance of Internal Fire Hydrants and Hose Reels on Premises* (1989). IS 3844:1989. New Delhi : Bureau of Indian Standards.
27. *Code of practice for fire extinguishing installations and equipment on premises. Part 1: Hose reels and foam inlets* (2006). BS 5306-1:2006. London : British Standards Institution.
28. *Specification for non-percolating layflat delivery hoses and hose assemblies for fire fighting purposes* (2009). BS 6391:2009. London : British Standards Institution

COMPARATIVE STUDY OF INTERNATIONAL TECHNICAL REQUIREMENTS FOR FIRE FIGHTING HOSES FOR FIXED SYSTEMS: CURRENT STATUS AND PROSPECTS OF UNIFICATION

Koval R.[1], Tverdokhlib O.[1], Yemelianenko S.[2], Sereda D.[1], Neseniuk L.[1]

[1]Institute of Scientific Research on Civil Protection of the National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine
[2]Lviv State University of Life Safety, Ukraine

KEYWORDS:
fire fighting hoses for fixed systems, technical requirements, fire safety, international standards, building codes, unification.

ABSTRACT

The purpose of this scientific investigation is to conduct a comparative study of international technical requirements for fire fighting hoses for fixed systems (hereinafter referred to as FFHFS), identify the main differences and develop proposals for possible directions for unifying technical requirements in the context of increasing the effectiveness of fire safety and ensuring compliance of the national fire protection system with international standards.
The article presents a comparative study of international technical requirements for FHS. This study includes an analysis of existing international standards (such as NFPA, EN, JIS, GB, IS, AS/NZS) and their comparison. Key differences in technical parameters (length, diameter, hose materials), working and test pressures, water flow rates, as well as approaches to the design, operation and intended use of FFHFS in different countries are identified. The study found out significant technical differences in the requirements for FFHFS between different countries of the world. Also, differences in hose diameters and lengths, types of connections (Storz, NST, JIS, GB, BS 336), materials, as well as in maintenance and certification practices were noted. It was shown that the Ukrainian regulatory framework is gradually adapting to European standards, but a comprehensive comparative analysis with other global approaches is insufficient. The data obtained are useful because they form the basis for developing proposals on possible directions of unification of technical requirements for FFHFS. They allow to identify specific areas where harmonization of Ukrainian standards with international ones is necessary, which will contribute to increasing the competitiveness of the domestic fire equipment market, simplifying international cooperation, importing modern technologies and exporting Ukrainian products. This will also help to develop more effective and safer fire extinguishing systems adapted to modern challenges and international practices.

Науковий вісник:
Цивільний захист та пожежна безпека

науковий журнал
ISSN 2518-1777

Підписано до друку 25.06.2025
Формат 60х90/8
Обл. вид. арк. –
Друк цифровий. Замовлення №___
Віддруковано згідно з наданим орігінал-макетом
ТОВ «Про формат»
Україна, 04080, м. Київ, вул. Кирилівська, 86
Реєстраційне свідоцтво ДК № 5942 від 11 січня 2018 р.
Тир. 50 прим.