



ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ БЕЗПЕКИ
ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

МАТЕРІАЛИ ДРУКУЮТЬСЯ УКРАЇНСЬКОЮ,
АНГЛІЙСЬКОЮ ТА ПОЛЬСЬКОЮ МОВАМИ

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

ПОЖЕЖНА
БЕЗПЕКА

ЛДУБЖД

№ 45, 2024

заснований у 2002 році

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Паснак І.В., *головний редактор*, к.т.н., доц., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Лавренюк О.І.**, *заступник головного редактора*, д.т.н., доц., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Яковчук Р.С.**, *заступник головного редактора*, д.т.н., доц., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Пазен О.Ю.**, *відповідальний секретар*, к.т.н., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Баланюк В.М.**, д.т.н., доц., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Башинський О.І.**, к.т.н., доц., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Вовк С.Я.**, к.т.н., доц., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Гащук П.М.**, д.т.н., проф., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Демчина Б.Г.**, д.т.н., проф., Національний університет «Львівська політехніка», Україна; **Домінік А.М.**, к.т.н., доц., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Смельяненко С.О.**, к.т.н., старший дослідник, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Кирилів В.І.**, к.т.н., с.н.с., Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка, Україна; **Коваленко В.В.**, к.т.н., с.н.с., Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Україна; **Ковалишин В.В.**, д.т.н., проф., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Коваль М.С.**, д.пед.н., проф., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Козяр М.М.**, д.пед.н., проф., Член-кореспондент НАПН України, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Костенко В.К.**, д.т.н., проф., Донецький національний технічний університет МОН України, Україна; **Кузик А.Д.**, д.с-г.н., проф., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Лозинський Р.Я.**, к.т.н., доц., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Лоїк В.Б.**, к.т.н., доц., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Михалічко Б.М.**, д.х.н., проф., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Попович В.В.**, д.т.н., проф., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Придатко О.В.**, к.т.н., доц., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Пгак Сімон**, PhD, Головна школа пожежної служби, Польща; **Ратушний Р.Т.**, д.т.н., проф., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Ренкас А.А.**, к.т.н., доц., Державна служба України з надзвичайних ситуацій, Україна; **Тацій Р.М.**, д.ф.-м.н., проф., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна; **Тригуба А.М.**, д.т.н., проф., Львівський національний аграрний університет, Україна; **Шукіс Ріголдас**, PhD, доц., Вільнюський технічний університет ім. Гедиміна, Литва; **Ярош Войцех**, PhD, Головна школа пожежної служби, Варшава, Польща.



Видавничий дім
«Гельветика»
2024

ISSN 2078-6662 (print)
ISSN 2708-1087 (online)

DOI: 10.32447/20786662.45.2024.00

ЗАСНОВНИКИ

Львівський державний університет
безпеки життєдіяльності (ЛДУБЖД)

Інститут державного управління та наукових
досліджень з цивільного захисту

ВИДАВЕЦЬ

Львівський державний університет
безпеки життєдіяльності (ЛДУБЖД)

ЗАРЕЄСТРОВАНО

Національною радою України з питань
телебачення та радіомовлення (рішення №292
від 08.02.2024, ідентифікатор медіа R30-02253)

**ВНЕСЕНО ДО ПЕРЕЛІКУ НАУКОВИХ ФАХОВИХ ВИДАНЬ УКРАЇНИ
ЯК ДРУКОВАНЕ ПЕРІОДИЧНЕ ВИДАННЯ КАТЕГОРІЇ «Б»**

(Наказ МОН України від 02.07.2020 року № 886)

ВНЕСЕНО ДО БІБЛОГРАФІЧНИХ БАЗ ДАНИХ:

*«Наукова періодика України» в Національній бібліотеці України
ім. В.І. Вернадського, «ULRICH'S PERIODICALS DIRECTORY»,
«Google Scholar» та ін.*

Рекомендовано до друку рішенням Вченої ради ЛДУБЖД

(Протокол № 5 від 18.12.2024 р.)

Літературний редактор

Чудеснова І.М.

Комп'ютерна верстка

Філатов А.О.

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ:

ЛДУБЖД, вул. Клепарівська, 35, м. Львів, 79007

Контактний телефон:

(099) 60 66 532

E-mail:

journal.firesafety@gmail.com

Збірник наукових праць «Пожежна безпека» видається з 2002 року. Запланована періодичність: 2 рази на рік. Тематична спрямованість: оригінальні та оглядові праці в галузі безпеки та оборони за спеціальністю Пожежна безпека.

Здано в набір 23.12.2024. Підписано до друку 26.12.2024.

Формат 60x84⁸. Ум. друк. арк. 10,46. Зам. № 0225/116. Наклад 150 прим.

Гарнітура Times New Roman. Папір офсетний. Цифровий друк.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

65101, м. Одеса, вул. Інглєзі, 6/1

Телефон +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08

E-mail: mailbox@helvetica.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 7623 від 22.06.2022 р.

ЗМІСТ

**В. М. Баланюк, В. С. Мирошкін,
Н. І. Гузар, В. С. Пикус, О. І. Гірський**
ЧИННИКИ ВПЛИВУ НА ШВИДКІСТЬ
ГОРІННЯ СПОЛУК, ІЗ ЯКИХ
УТВОРЮЮТЬСЯ ВОГНЕГАСНІ
АЕРОЗОЛІ

5

**В. В. Ковалишин, Н. Р. Великий,
Вол. В. Ковалишин, А. С. Лин,
П. В. Пастухов, А. Є. Великий**
ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ
КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ
ПРИ ПОДАВАННІ «ПІДШАРОВИМ»
СПОСОБОМ

10

А. Ф. Гаврилюк, М. О. Гайдук
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ
ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ
ВОГНЕЗАХИСНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ
ДЕРЕВ'ЯНИХ БУДІВЕЛЬНИХ
КОНСТРУКЦІЙ ПРИ ЗАМІНІ
ВОГНЕЗАХИСНОГО ЗАСОБУ

18

**Л. Ф. Дзюба, О. В. Лазаренко,
О. Ю. Пазен, П. В. Пастухов**
ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКІВ ЗАГОРЯННЯ
ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

29

**А. М. Домінік, Ю. М. Нагірняк,
Д. В. Фреюк**
АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ
НЕГАТИВНОГО ВПЛИВУ
ТЕПЛООВОГО ПОТОКУ ВІД
ОСЕРЕДКУ ПОЖЕЖІ НА
НАВКОЛИШНІ ОБ'ЄКТИ

39

**А. П. Кушнір, Б. Л. Копчак,
В. М. Оксентюк, С. Я. Вовк**
СИНТЕЗ ДВОМАСОВОЇ
СИСТЕМИ ПІДПОРЯДКОВАНОГО
РЕГУЛЮВАННЯ ПОВОРОТОМ
РОБОЧОЇ ПЛАТФОРМИ
ПОЖЕЖНОГО АВТОПІДІЙМАЧА
НА ОСНОВІ
ДРОБОВИХ РЕГУЛЯТОРІВ

46

**В. І. Лушч, Є. В. Кобко, Я. Б. Великий,
Б. А. Романик**
ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ
ЕФЕКТИВНОСТІ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ
У МАНСАРДНИХ ПРИМІЩЕННЯХ

55

CONTENTS

**V. M. Balanyuk, V. S. Myroshkin,
N. I. Huzar, V.S. Pykus, O. I. Girskyi**
FACTORS INFLUENCING THE
BURNING RATE OF COMPOUNDS
FROM WHICH FIRE EXTINGUISHING
AEROSOLS ARE FORMED

**V. V. Kovalyshyn, N. R. Velykyi,
Vol. V. Kovalyshyn, A. S. Lyn,
P. V. Pastukhov, A. Ye. Velykyi**
RESEARCH OF THE INTENSITY AND
MULTIPLICITY OF COMPRESSION
FOAM WHEN SUPPLIED
IN A "SUB-LAYER" WAY

A. F. Havryliuk, M. O. Haiduk
EXPERIMENTAL STUDY OF
FIRE PROTECTION EFFICIENCY
INDICATORS OF WOODEN BUILDING
STRUCTURES WHEN REPLACING
FIRE RETARDANT

**L. F. Dzyuba, O. V. Lazarenko,
O. Yu. Pazen, P. V. Pastukhov**
ASSESSMENT OF THE FIRE RISKS OF
ELECTRIC VEHICLES

**A. M. Dominik, Yu. M. Nahirniak,
D. V. Freiuk**
ANALYSIS OF RESEARCH ON THE
NEGATIVE INFLUENCE OF HEAT
FLOW FROM THE FIRE CENTER
ON THE SURROUNDING OBJECTS

**A. P. Kushnir, B. L. Kopchak,
V. M. Oksentiuk, S. Ya. Vovk**
SYNTHESIS OF A TWO-MASS
SYSTEM OF SUBORDINATE
REGULATION
OF THE FIRE LIFT WORKING
PLATFORM BY ROTATION
BASED ON FRACTIONAL
CONTROLLERS

**V. I. Lushch, Ye. V. Kobko,
Ya. B. Velykyi, B. A. Romanyk**
WAYS TO IMPROVE THE EFFICIENCY
OF EXTINGUISHING FIRES
IN ATTIC ROOMS

ЗМІСТ

***П. В. Пастухов, О. І. Лавренюк,
Б. М. Михалічко***
ВПЛИВ МЕТАЛООРГАНІЧНИХ
КОМПЛЕКСІВ НА ГОРЮЧИСТЬ
І ДИМОУТВОРЮВАЛЬНУ ЗДАТНІСТЬ
ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ НА
ОСНОВІ ЕПОКСИДНИХ СМОЛ

Д. В. Середа, Я. В. Балло
УДОСКОНАЛЕННЯ
РОЗРАХУНКОВОГО МЕТОДУ
ВИЗНАЧЕННЯ ПРОТИПОЖЕЖНИХ
ВІДСТАНЕЙ ДЛЯ ВІТРОВИХ
ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК

***О. С. Черненко, В. В. Калінчак,
М. О. Іванов, О. К. Копійка***
ОЦІНЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ
ЗАЙМАННЯ БІНАРНИХ РОЗЧИНІВ

CONTENTS

64

***P. V. Pastuhov, O. I. Lavrenyuk,
B. M. Mykhalichko***
INFLUENCE OF ORGANOMETALLIC
COMPLEXES ON THE
COMBUSTIBILITY AND
SMOKE-FORMING ABILITY
OF POLYMERIC MATERIALS BASED
ON EPOXY RESINS

71

D. V. Sereda, Ya. V. Ballo
IMPROVEMENT OF THE
CALCULATION METHOD FOR
DETERMINING FIRE DISTANCES FOR
WIND POWER PLANTS

81

***O. S. Chernenko, V. V. Kalinchak,
M. O. Ivanov, O. K. Kopyka***
DETERMINATION OF FIRE POINT
BINARY LIQUID SOLUTION



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.45.2024.01>

В. М. Баланюк, В. С. Мирошкін, Н. І. Гузар, В. С. Пикус, О. І. Гірський
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
м. Львів, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0853-4229> – В. М. Баланюк
<https://orcid.org/0000-0003-3907-6945> – В. С. Мирошкін
<https://orcid.org/0009-0003-7189-6545> – Н. І. Гузар
<https://orcid.org/0000-0002-8850-9068> – В. С. Пикус
<https://orcid.org/0000-0001-6225-0601> – О. І. Гірський
✉ bagr33@ukr.net

ЧИННИКИ ВПЛИВУ НА ШВИДКІСТЬ ГОРІННЯ СПОЛУК, ІЗ ЯКИХ УТВОРЮЮТЬСЯ ВОГНЕГАСНІ АЕРОЗОЛІ

У статті розглядається актуальне питання впливу різних чинників на швидкість горіння вогнегасних аерозолеутворювальних сполук (АУС). Аерозольні засоби пожежогасіння набувають усе більшої популярності завдяки своїй ефективності, низьким вогнегасним концентраціям та екологічній безпеці. Однак для їх ефективного застосування необхідно розуміти й контролювати фактори, що впливають на швидкість горіння АУС та утворення вогнегасного аерозолю.

Виявлення й аналіз чинників, що впливають на швидкість горіння АУС, з метою оптимізації їх складу й підвищення ефективності гасіння пожеж.

У роботі використано метод наукового аналізу та синтезу, а також експериментальний метод дослідження.

Визначено основні чинники, що впливають на швидкість горіння АУС, хімічний склад і співвідношення компонентів АУС (паливо, окисник, каталізатори, добавки), геометричні параметри заряду АУС (наявність каналів, отворів), фізичні властивості компонентів (температура плавлення, молекулярна маса), наявність внутрішньо зв'язаного оксигену в молекулярній будові палива. Установлено, що для збільшення швидкості горіння АУС необхідно використовувати термічно нестійкі горючі речовини (каучуки, ідитол, сахарозу, епоксидну смолу), оптимальне співвідношення окисників (нітрат калію, хлорат калію, перхлорат калію) і каталітичні добавки. Показано, що забезпечення максимальної площі горіння АУС і використання складної геометричної конструкції заряду сприяють збільшенню швидкості утворення вогнегасного аерозолю.

Швидкість горіння АУС є ключовим фактором, що визначає ефективність гасіння пожеж.

Для досягнення високої швидкості горіння необхідно оптимізувати склад АУС, урахувавши хімічні й фізичні властивості компонентів, а також геометричні параметри заряду.

Подальші дослідження повинні бути спрямовані на детальне вивчення впливу кожного з чинників на швидкість горіння АУС і розроблення нових ефективних складів аерозолеутворювальних сполук.

Ключові слова: вогнегасні аерозолеутворювальні сполуки, швидкість горіння, паливо, окисник, каталізатор, геометричні параметри, вогнегасна ефективність.

FACTORS INFLUENCING THE BURNING RATE OF COMPOUNDS FROM WHICH FIRE EXTINGUISHING AEROSOLS ARE FORMED

The article deals with the topical issue of the influence of various factors on the combustion rate of fire extinguishing aerosol compounds (AFC). Aerosol fire extinguishing agents are becoming increasingly popular due to their efficiency, low fire extinguishing concentrations and environmental safety. However, for their effective use, it is necessary to understand and control the factors that affect the burning rate of AFC and the formation of fire extinguishing aerosol.

To identify and analyse the factors affecting the burning rate of AUS in order to optimise their composition and increase the efficiency of fire extinguishing.

The method of scientific analysis and synthesis, as well as the experimental method of research were used in the work.

The main factors influencing the burning rate of AFC were determined. The chemical composition and ratio of the components of the AFC (fuel, oxidant, catalysts, additives). Geometric parameters of the AFC charge (presence of channels, holes). Physical properties of the components (melting point, molecular weight). The presence of internally bound oxygen in the molecular structure of the fuel. It has been established that to increase the combustion rate of AFC, it is necessary to use thermally unstable combustibles (rubbers, iditol, sucrose, epoxy resin), the optimal ratio of oxidants (potassium nitrate, potassium chlorate, potassium perchlorate) and catalytic additives. It is shown that ensuring the maximum combustion area of the AFC and the use of a complex geometric charge design contribute to an increase in the rate of fire extinguishing aerosol formation.

The combustion rate of AFC is a key factor determining the effectiveness of fire extinguishing.

To achieve a high combustion rate, it is necessary to optimise the composition of the AFC, taking into account the chemical and physical properties of the components, as well as the geometric parameters of the charge.

Further research should be aimed at a detailed study of the influence of each of the factors on the burning rate of the AFC and the development of new effective compositions of aerosol-forming compounds.

Key words: fire extinguishing aerosol-forming compounds, combustion rate, fuel, oxidant, catalyst, geometric parameters, fire extinguishing efficiency.

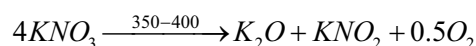
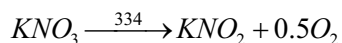
Постановка проблеми. Відомо, що останнім часом у сфері пожежогасіння широкого застосування набули вогнегасні аерозолеутворювальні сполуки (далі – АУС). Вони мають певні переваги [1–4], найважливіші з яких такі: вогнегасна концентрація аерозолу, яку необхідно створити в осередку пожежі, є близько 5 разів меншою за необхідну концентрацію для гасіння порошковими засобами, для зберігання аерозолеутворювальних зарядів не потрібно посудин під тиском, твердопаливний аерозолеутворювальний заряд і вогнегасний аерозоль, що утворюється, екологічно безпечні (озононеруйнівні) та нетоксичні. На відміну від порошоків, аерозоль створює захист від повторного виникнення дифузійного горіння протягом 30 хвилин, собівартість протипожежного захисту 1 м³ вогнегасними аерозолями є найменшою порівняно з іншими засобами об'ємного пожежогасіння – галоїдовуглеводнями, газовим і порошковим пожежогасінням [5]. З огляду на це, аерозольні засоби пожежогасіння можна вважати універсальними засобами об'ємного пожежогасіння, але вони також характеризуються певними

недоліками. Під час утворення вогнегасного аерозолу спостерігається утворення форсу полум'я, що набуває значних розмірів, а температура його сягає 1000 °С, вогнегасна концентрація більшості вогнегасних аерозолів лежить у межах від 10 до 100 г/м³ при різних компонентних рецептурах АУС. Деякі АУС володіють високою температурою кінцевого продукту – аерозолу. Крім цього, у продуктах горіння АУС спостерігається наявність продуктів неповного окислення в кількостях, які можуть бути небезпечними для людини. Для АУС спостерігається така закономірність: АУС із високою температурою горіння характеризуються низькою вогнегасною концентрацією порядку 25–45 г/м³, утворенням форсу полум'я та високою температурою вогнегасного аерозолу, генератори на базі таких АУС обладнані додатковими блоками охолодження, що знижують як температуру аерозолу, так і вогнегасну ефективність аерозолу. Для генераторів вогнегасного аерозолу на базі АУС, до склад якого внесені охолоджувачі, спостерігається інша закономірність: температура горіння АУС є низькою за рахунок

наявності в АУС фізичних охолоджувачів – КСl, К₂СО₃, К₂SO₄, силікатів, цементу. Під час горіння такого АУС збільшується вогнегасна концентрація аерозолу, а в газову фазу потрапляє більша кількість токсичних продуктів горіння. Швидкість згорання зазначених АУС становить близько від 10 до 100 г/с. При цьому, відповідно, заряд АУС може згоріти в проміжку часу від 20 до 90 секунд залежно від конфігурації АУС і його маси. Як видно з результатів досліджень авторів [6], швидкість горіння АУС залежить від таких чинників, як хімічний склад рецептури АУС, геометричний розмір АУС, забезпечення максимальної площі горіння АУС тощо. Швидко утворення вогнегасного аерозолу забезпечує значне зменшення часу гасіння й ліквідації пожежі. Бажаний час утворення аерозолу для ефективного та швидкого гасіння може становити до 10 секунд.

Виклад основного матеріалу. Щоб правильно спрогнозувати пошук оптимальних складів АУС із великою швидкістю горіння й одержати, відповідно, ефективні вогнегасні аерозолі з них, необхідно розглянути можливий фізико-хімічний механізм дії аерозолів і виявити найважливіші фактори, що впливають на їх вогнегасну ефективність. Відомо [7], що для збільшення швидкості горіння як паливо в АУС використовують термічно нестійкі горючі речовини, такі як каучуки, ідітол, сахароза, епоксидна смола. Якщо розглянути властивості сахарози як палива, то сахароза (C₁₂H₂₂O₁₁) у складі води не має й тому не потребує затрат тепла на її видалення, температура її плавлення 160 °С із розкладанням [8]. Епоксидна смола має більшу молекулярну масу – близько 390 г/моль, ніж новолачна смола – ідітол, як наслідок, найнижчу ефективність завдяки зменшенню ступеня перетворення АУС в аерозоль. Сподівання на те, що фрагменти недопалу палива (особливо ідітолу й епоксидно-діанової смоли) можуть позитивно впливати на вогнегасну ефективність аерозолів, як видно, не підтверджується. Як указує автор [9], основною умовою вогнегасної ефективності аерозолів є максимально повне перетворення палива в СО₂ і Н₂О та твердофазні аерозолі. Таким чином, необхідно зазначити, що для збільшення швидкості горіння АУС горючі речовини повинні максимально швидко розкладатися для підготовки до їх згорання [10]. Важливим чинником є наявність у молекулярній будові палива внутрішньозв'язаного кисену, який забезпечує більш швидку термодеструкцію та згорання горючої речовини. Потреба кисню для згорання вуглеводнів є меншою, ніж для інших горючих речовин [11]. На користь того, що умовою високої ефективності є повнота згорання палива, свідчать

і результати дослідів, проведених на рецептурах АУС, у яких наявний додатково активний окисник КСlО₄, що різко збільшує швидкість перетворення АУС в аерозоль і, відповідно, до зростання вогнегасної ефективності порівняно з АУС на основі КNO₃ [12]. Також, як указує автор [13], особливо цікавим є той факт, що зразки АУС, де окисником є тільки КСlО₄, проявляють вогнегасну ефективність, значно нижчу, ніж із КNO₃ [10]. КNO₃ розкладається, відповідно, на молекулярний окисген, нітрид та оксид калію при температурах 334, 350, 400 °С.



Відомо [14], що в рецептурах АУС, у яких міститься КNO₃ та КСlО₄, проявляється максимальна вогнегасна ефективність, а також найвищий ступінь перетворення цих компонентів у кінцевий аерозоль. Це можна пояснити ефектом синергізму компонентів аерозолу – КСl та К₂О або К₂СО₃ або (і) КОН [15]. Якщо розглянути процес горіння на прикладі сахарози, то необхідно зазначити, що вогнегасна концентрація для такого АУС становить близько 10 г/м³, причому збільшення вмісту КСlО₄ в складі АУС призводить до деякого зменшення вогнегасної концентрації. І при зменшенні концентрації до КNO₃ до 60 г і збільшенні концентрації перхлорату калію до 12 г вогнегасна концентрація зменшується до 10,1 г/м³ (таблиця 1).

Таблиця 1

Залежність вогнегасної ефективності від співвідношення окислювачів для палива сахарози

Уміст компонентів АУС, грамів			С _в , г/м ³
окисники		паливо	
КNO ₃	КСlО ₄	сахароза	
70	2	30	14,5
65	7	30	12,5
60	12	30	10,8
55	15	30	10,1

З огляду на вищесказане, необхідно зазначити, що з урахуванням параметрів горіння АУС як окисники необхідно використати нітрат калію, хлорат калію, перхлорат калію або їх суміші. Що стосується сумішей на основі нітрату калію, то необхідно зазначити, що нітрат калію розкладається з утворення проміжних продуктів, які можуть активно вступати у взаємодію з горючими елементами, такими як деревне вугілля, ідітол, епоксидна смола й сахароза.

Щодо характеристик кожного із цих палив, то необхідно зазначити, що майже всі вони легко розкладаються з утворенням готових до швидкого згорання компонентів. При цьому відбувається утворення фронту полум'я над поверхнею зразка та перехід продуктів горіння в аерозоль. При цьому перехід продуктів горіння в аерозоль відбувається внаслідок конденсації солей калію, водяної пари, вуглекислого газу й азоту. При цьому більша кількість газової фази буде утворюватися внаслідок збільшення концентрації горючого в АУС у невеликій перевазі над стехіометричною концентрацією, що є ще одним шляхом збільшення швидкості горіння через зміну фізичного чинника, а саме тиску.

Також хочемо зазначити, що збільшення швидкості горіння АУС буде працювати в разі збільшення тиску всередині генератора, що буде тягнути за собою збільшення швидкості горіння заряду АУС, що є ще одним перспективним шляхом збільшення швидкості горіння АУС. Збільшення кількості палива, дещо більше за стехіометричну концентрацію, як зазначає автор [8], призведе до утворення більшого факела, а також підвищення сумарної кількості гарячих продуктів, тобто більш нагрітого аерозолю, на охолодження якого витратиметься більше часу. У цьому випадку нагрітий аерозоль буде накопичуватися у верхній частині приміщення, тобто буде створюватися градієнт концентрацій аерозолю за висотою. Як зазначає автор [8], складання рецептур АУС із надлишком палива ставить вимоги й до конструкції генераторів, а саме необхідності забезпечення контакту утворюваного аерозолю з киснем повітря. У протилежному разі не буде забезпечено утворення додаткового тепла, необхідного для повного розкладу KNO_3 , що, у свою чергу, змістить перебіг реакцій горіння в бік утворення продуктів розкладу CO та KNO_2 . При цьому, зважаючи на описане, збільшення тиску внаслідок збільшення об'єму газоподібних продуктів може становити від 60 атмосфер і більше залежно від перерізу отворів вихідних сопел генератора вогнегасного аерозолю. При такому збільшенні тиску теоретичне зростання швидкості горіння АУС може становити декілька сотень разів залежно від збільшення концентрації кисню.

Виходячи з вищенаведеного, можемо сформулювати умови, які б забезпечували максимальну швидкість горіння АУС, а саме:

1) стехіометричне, або з надлишком палива співвідношення компонентів у суміші. Оптимальне співвідношення компонентів горючого в суміші (якщо їх є більше);

2) наявність каталітичних добавок, які забезпечують збільшення швидкості горіння АУС;

складна геометрична конструкція заряду АУС, яка передбачає наявність каналів, отворів в АУС.

Висновки. Таким чином, для збільшення швидкості горіння АУС необхідно дослідити низку чинників, які можуть впливати на швидкість горіння АУС, а саме: тип і співвідношення палива, тип і співвідношення окисника, тип і кількість каталізаторів, які необхідно додати до рецептури АУС, цільові добавки, які підвищують вогнегасну ефективність та експлуатаційні показники, а також геометричні параметри заряду АУС.

Список літератури

1. Meenakshi Rohilla, Amit Saxena, Prem chand, Braham Prakash, Kavita Devi, Rajesh Kumar Tanwar, Rajiv Narangl & Yogesh Kumar Tyagi Graphene oxide-enhanced aerosol forming composites: A study for fire extinguishing applications *Indian Journal of Chemical Technology*. 2024. Vol. 31. P. 44–56. DOI: 10.56042/ijct.v31i1.4596.
2. Condensed Aerosol Based Fire Extinguishing System Covering Versatile Applications: A Review / R. Meenakshi et al. *Fire Technology*. 2022. Vol. 58. P. 327–351. DOI: 10.1007/s10694-021-01148-4.
3. Zhang X., Ismail M.H.S., Hee C. Hot aerosol fire extinguishing agents and the associated technologies: a review. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2015. Vol. 32. P. 707–724.
4. Piotr I., Artur K. Mechanism of fire-extinguishing aerosol's action. *Safety & Fire Technology*. 2017. Vol. 46 (2). P. 56–71.
5. Порівняння вогнегасних речовин для гасіння пожеж легкозаймистих та горючих рідин / Баланюк В. М., Мирошкін В. С., Копистинський Ю. О. та інші. *Пожежна безпека*. 2022. № 41. С. 12–19. DOI: 10.32447/20786662.41.2022.02.
6. Study of Fire-extinguishing Efficiency of Environmentally Friendly Binary Aerosol-nitrogen Mixtures / V. Balanyuk et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 3. № 10. P. 4–11. Doi: 10.15587/1729-4061.2016.72399.
7. Balanyuk V., Kovalyshyn V., Kozyar N. Effect of ecologically safe gas-aerosol mixtures on the velocity of explosive combustion of n-heptane. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. № 4 (10 (88)). P. 12–19. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108427>.
8. Баланюк В. М. Удосконалення аерозолевої вогнегасної речовини на основі солей калію та обґрунтування умов її застосування : дис. ... канд. тех. наук : 21.06.02. Львів, 2006, 172 с.
9. Sonkar R. Condensed aerosol fire suppression system. *Fire Engineer*. 2017. № 42.2. P. 8–10.
10. Бондаренко С. М. Розробка генераторів вогнегасячого аерозолю із покращеними характеристиками : дис. ... канд. тех. наук : 21.06.02. Харків, 2004. 250 с.
11. Перебіг окремих внутрішніх процесів у вогнегасних аерозолях під час гасіння дифузійного полум'я/

В. М. Баланюк, Ю. О. Копистинський, О. І. Лавренюк. *Науковий вісник УкрНДІПБ. Серія «Технічні науки»*. Київ, 2008. № 1 (17). С. 155–159.

12. Rohilla M., Saxena A., Tyagi Y. K. Factors affecting the burn rate and combustion temperature of fire-extinguishing aerosol-forming composite material. *Journal of Materials Research*. 2023. № 38(3). P. 789–798.

13. Two-stage aerosol formation in low-temperature combustion / O. El Hajj, K. Atwi, Z. Cheng et al. *Fuel*. 2021. № 304. P. 121322.

14. Quantifying the CO and CO₂ Mole Fraction in the Plume of an Aerosol-Based Fire Extinguishing Agent Using 4560 nm and 4320 nm QCLs A. Roy, R. S. Chawhan, R. Patel et al. *IEEE Sensors Journal*. 2019. № 19 (21). P. 9728–9735.

15. Improving strontium nitrate-based aerosol by magnesium powder / Z. Chen-guang, W. Jun, X. Wan-Xing et al. *Fire Technol*. 2014. № 51. P. 97–107. <https://doi.org/10.1007/s10694-013-0361-6>.

References

1. Meenakshi, Rohilla, Amit, Saxena, Prem, chand, Braham, Prakash, Kavita. Devi, Rajesh. Kumar, Tanwar, Rajiv, Narangl & Yogesh Kumar (2024). Tyagi Graphene oxide-enhanced aerosol forming composites: A study for fire extinguishing applications *Indian Journal of Chemical Technology* Vol. 31, January 2024, pp. 44–56. DOI: 10.56042/ijct.v31i1.4596 [in English].

2. Meenakshi, R., Amit, S., Yogesh, K., Inderpal, S., Kumar, T., Rajiv, N. (2022). Condensed Aerosol Based Fire Extinguishing System Covering Versatile Applications: A Review. *Fire Technology*. 2022. Vol. 58, P. 327–351. DOI: 10.1007/s10694-021-01148-4 [in English].

3. Zhang, X., Ismail, M.H.S., & Hee, C. (2015). Hot aerosol fire extinguishing agents and the associated technologies: a review. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 32, 707–724 [in English].

4. Piotr, I., & Artur, K. (2017). Mechanism of fire-extinguishing aerosol's action. *Safety & Fire Technology*, 46 (2), 56–71 [in English].

5. Balaniuk V. M., Myroshkin V. S., Kopystynskyi Yu. O., Hirskyi O. I., Harasymiuk O. I. (2022). Porivniannia vohnehasnykh rehovyn dlia hasinnia pozhezh lehkozaimystykh ta horiuchykh ridyn. [Comparison of extinguishing agents for extinguishing fires of flammable and combustible liquids]. *Pozhezhna bezpeka*. Fire safety. № 41. С. 12–19. DOI: 10.32447/20786662.41.2022.02 [in Ukrainian].

6. Balanyuk, V. M. (2016). Study of Fire-extinguishing Efficiency of Environmentally Friendly Binary Aerosol-nitrogen Mixtures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 3, no. 10, pp. 4–11, doi: 10.15587/1729-4061.2016.72399 [in English].

7. Balanyuk, V., Kovalishin, V., & Kozyar, N. (2017). Effect of ecologically safe gas-aerosol mixtures on the velocity of explosive combustion of n-heptane. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (10 (88)), 12–19. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108427> [in English].

8. Balaniuk V. M. (2006). Udoskonalennia aerezolevoi vohnehasnoi rehovyny na osnovi solei kaliuu ta obhruntuvannia umov yii zastosuvannia [Improvement of an aerosol fire extinguishing agent based on potassium salts and substantiation of its application conditions] : dys. kand. tekhn. nauk 21.06.02. Lviv, 172 s. [in Ukrainian].

9. Sonkar, Rahul. (2017). Condensed aerosol fire suppression system. *Fire Engineer* 42.2 (2017): 8–10 [in English].

10. Bondarenko, S. M. (2004). Rozrobka heneratoriv vohnehasiachoho aerezoliu iz pokrashchenymy kharakterystykamy [Development of fire extinguishing aerosol generators with improved characteristics]. *Rukopys : dys. kand. tekhn. nauk : 21.06.02*. Kharkiv, 250 p. [in Ukrainian].

11. Balaniuk, V. M., Kopystynskyi, Yu. O., Lavreniuk, O. I., & Zhurbynskyi, D. A. (2008). Perebih okremykh vnutrishnikh protsesiv u vohnehasnykh aerezoliakh pid chas hasinnia dyfuziinoho polumia. [The course of some internal processes in fire extinguishing aerosols during extinguishing of diffusion flames.] *Naukovyi visnyk UkrNDIPB* [Scientific Bulletin of UkrNDIPB.] *Tekhnichni nauky*. Kyiv. № 1 (17). P. 155–159 [in Ukrainian].

12. Rohilla, M., Saxena, A., & Tyagi, Y. K. (2023). Factors affecting the burn rate and combustion temperature of fire-extinguishing aerosol-forming composite material. *Journal of Materials Research*, 38 (3), 789–798 [in English].

13. El Hajj, O., Atwi, K., Cheng, Z., Koritzke, A. L., Christianson, M. G., Dewey, N. S., Saleh, R. (2021). Two-stage aerosol formation in low-temperature combustion. *Fuel*, 304, 121322 [in English].

14. Roy, A., Chawhan, R. S., Patel, R., Varadhara-jan, S., Tiwari, L. M., Chakraborty, A. L., & Srivastava, G. (2019). Quantifying the CO and CO₂ Mole Fraction in the Plume of an Aerosol-Based Fire Extinguishing Agent Using 4560 nm and 4320 nm QCLs. *IEEE Sensors Journal*, 19 (21), 9728–9735 [in English].

15. Chen-guang Z, Jun W, Wan-Xing X, Ting-Ting Z (2014). Improving strontium nitrate-based aerosol by magnesium powder. <https://doi.org/10.1007/s10694-013-0361-6> I Zhu, Cg., Wang, J., Xie, Wx. et al. Improving Strontium Nitrate-Based Extinguishing Aerosol by Magnesium Powder. *Fire Technol* 51, 97–107. <https://doi.org/10.1007/s10694-013-0361-6> [in English].

© В. М. Баланюк, В. С. Мирошкін, Н. І. Гузар, В. С. Пикус, О. І. Гірський, 2024.

Оглядова стаття.

Надійшла до редакції 10.11.2024.

Прийнято до публікації 18.12.2024.

DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.45.2024.02>

В. В. Ковалишин, Н. Р. Великий, Вол. В. Ковалишин, А. С. Лин, П. В. Пастухов, А. Є. Великий
*Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
м. Львів, Україна*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5463-0230> – В. В. Ковалишин
<https://orcid.org/0000-0002-7967-4491> – Н. Р. Великий
<https://orcid.org/0000-0003-3739-8668> – Вол. В. Ковалишин
<https://orcid.org/0000/0002/4012/4556> – А. С. Лин
<https://orcid.org/0000-0002-3140-1101> – П. В. Пастухов
<https://orcid.org/0009-0002-5987-9745> – А. Є. Великий
✉ nvelukuy6@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ ПРИ ПОДАВАННІ «ПІДШАРОВИМ» СПОСОБОМ

Підвищення ефективності різних видів пожежогасіння є актуальним завданням як для українських пожежно-рятувальних служб, так і для міжнародної спільноти. У повсякденній діяльності пожежно-рятувальних підрозділів для гасіння пожеж, порятунку життя людей і ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій використовуються різні види техніки. Однак сучасні виклики вимагають удосконалення техніки та способів гасіння. Зокрема, війна в Україні суттєво змінила підхід до стратегій пожежогасіння й порятунку, підкресливши необхідність модернізації пожежної техніки та обладнання. Удосконалення протипожежного обладнання особливо важливе в нафтовій галузі, яка стає все більш вразливою до надзвичайних ситуацій. Більшу увагу варто приділити безпечним способам пожежогасіння, а саме використанню «підшарового» способу гасіння компресійною піною. Для правильного використання цього способу треба вивчити властивості компресійної піни й можливості її застосування для «підшарового» способу гасіння пожеж у резервуарах зі зберіганням нафтопродуктів.

Метою роботи є визначення впливу різної інтенсивності подавання піни та її кратності «підшаровим» способом.

Для теоретичних досліджень використовувався програмний продукт SolidWorks Flow Simulations, також за допомогою аналітичних методів досліджено використання піни в пожежогасінні. Методи з визначення якості піни, кратності й інтенсивності її подавання.

У дослідженнях вдалося встановити, що подавання компресійної піни з кратністю 10 (K10) «підшаровим» способом більш вигідне, ніж подавання піни з кратністю 5 (K5), визначено необхідний резервний об'єм резервуара у випадку тривалості горіння 30 хв до початку подавання піни.

На гасіння резервуара з нафтопродуктом за допомогою піни K5 витрачено 4019 кг і 4319 кг піноутворювача при тиску в 3 атм і 4 атм відповідно, що становить у 3 рази більше, ніж при використанні піни K10 (1377 кг і 1389 кг при тих самих тисках). Також відрізняється й час гасіння: при подаванні піни K5 час гасіння становить 598 с і 482 с при тисках 3 атм і 4 атм відповідно, що є на 188 с і 172 с більше, ніж при використанні піни K10 (410 с і 310 с при тих самих тисках). Отже, звідси випливає, що подавання піни K5 є економічно не вигідним і займає більше часу. Використання піни кратністю 10 для «підшарового» гасіння пожежі є значно ефективнішим від піни кратністю 5. Чим вища кратність і продуктивність подачі піни, тим вищою буде ефективність гасіння. Необхідний резервний об'єм резервуара у випадку тривалості горіння 30 хв до початку подавання піни K10 і продуктивністю 56 кг/с становить близько 13%.

Ключові слова: компресійна піна, CAFS, резервуари нафти, нафтопродукти, кратність, інтенсивність подавання.

RESEARCH OF THE INTENSITY AND MULTIPLICITY OF COMPRESSION FOAM WHEN SUPPLIED IN A “SUB-LAYER” WAY

Introduction. Improving the efficiency of various firefighting methods is a pressing task for both Ukrainian fire and rescue services and the international community. In their daily operations, fire and rescue units use various types of equipment to extinguish fires, save lives, and mitigate the consequences of emergencies. However, modern challenges require enhancements in firefighting techniques and methods. In particular, the war in Ukraine has significantly altered the approach to firefighting and rescue strategies, emphasizing the need to modernize fire equipment and technology. The improvement of firefighting equipment is especially crucial in the oil industry, which is becoming increasingly vulnerable to emergencies. Special attention should be given to safe firefighting methods, specifically the use of the “subsurface” method with compressed air foam. To properly utilize this method, it is essential to study the properties of compressed air foam and its potential application in “subsurface” firefighting for storage tanks containing petroleum products.

The aim of this work is to determine the impact of varying foam delivery intensity and expansion ratio using the “subsurface” method.

For theoretical research, the SolidWorks Flow Simulation software was used, and analytical methods were applied to study the use of foam in firefighting. Methods for determining foam quality, expansion ratio, and delivery intensity were also examined.

These studies established that delivering compressed air foam with an expansion ratio of 10 (K10) using the “subsurface” method is more advantageous than using foam with an expansion ratio of 5 (K5). Additionally, the required reserve volume of the tank was determined in the case of a 30-minute burn duration before the start of foam delivery.

Extinguishing a tank with petroleum products using K5 foam consumed 4019 kg and 4319 kg of foam concentrate at pressures of 3 atm and 4 atm, respectively, which is three times more than when using K10 foam (1377 kg and 1389 kg at the same pressures). The extinguishing time also differed: with K5 foam, the extinguishing time was 598 s and 482 s at pressures of 3 atm and 4 atm, respectively, which is 188 s and 172 s longer than when using K10 foam (410 s and 310 s at the same pressures). Therefore, the use of K5 foam is economically inefficient and takes more time. Using foam with an expansion ratio of 10 for “subsurface” firefighting is significantly more effective than foam with an expansion ratio of 5. The higher the expansion ratio and foam delivery rate, the greater the firefighting efficiency. The required reserve volume of the tank, assuming a 30-minute burn duration before the start of K10 foam delivery and a delivery rate of 56 kg/s, is approximately 13%.

Key words: compressed air foam, CAFS, oil tanks, petroleum products, expansion ratio, delivery intensity.

Постановка проблеми. Гасіння резервуарів, де зберігається нафта й нафтопродукти, включає складний процес, що потребує великих зусиль і залучення значної кількості ресурсів. Пожежі, що виникають на об'єктах нафтової промисловості, часто розвиваються швидко й можуть тривати довгий час, це створює серйозні загрози для безпеки працівників і рятувальників, які займаються їх ліквідацією.

Це видно з прикладів великих катастроф, які сталися в нафтопереробній галузі. Один із таких випадків стався на найбільшому у Венесуелі нафтопереробному заводі «Атусау» 25 серпня 2012 року. Вибух призвів до смерті 48 осіб, а ще 151 людина отримала поранення. Пожежу, яка охопила три великі нафтові резервуари, ліквідували три дні [1].

Інший жакхливий інцидент трапився на одному з підприємств мексиканської нафтової компанії «Ретех» 19 вересня 2012 року. Вогонь швидко

поширився, забравши із собою життя 66 людей і залишивши 76 осіб травмованими [2].

Також варто відзначити пожежу на нафтохімічному заводі DeerPark у Техасі, США, що сталася 17 березня 2019 року і тривала 4 дні. У результаті цієї події знищено десять нафтових резервуарів. Збитки від цієї катастрофи оцінили на майже 1 млрд доларів США, підкреслюючи серйозний вплив подібних інцидентів на економіку й середовище [3].

Під час війни в Україні актуальним стає питання захисту об'єктів нафтової промисловості. Ракетні удари по нафтових резервуарах призводять до їх руйнування, великого витоку нафтопродуктів і можуть спричинити масштабні пожежі. Гасіння пожеж у резервуарах із нафтою та нафтопродуктами є одним із найскладніших завдань, оскільки вони спричиняють значні матеріальні й екологічні збитки, а також становлять серйозну загрозу для життя і здоров'я людей [4].

Саме тому об'єкти нафтової промисловості потребують удосконалення систем пожежогасіння. Дослідження, присвячені розробленню системи для «підшарового» гасіння резервуарів з нафтою та нафтопродуктами за допомогою компресійної піни, є актуальними й допоможуть пожежним підрозділам забезпечити більш швидке та безпечне гасіння пожеж такого роду.

Основні переваги компресійної піни: менший проміжок часу на гасіння пожежі, менші витрати води й піноутворювача (води – у 2–5 разів, піни – у 5–15 разів), можливість подавання піни на велику відстань. Також варто зазначити, що компресійна піна значно легша, а тому це підвищує маневреність ствольника. Крім того, у разі використання компресійної піни зменшуються побічні матеріальні збитки при гасінні пожеж житлових будинків за рахунок низького вмісту води в піні.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У дослідженні [5] автори розглядають методи пожежного захисту резервуарів, зокрема технологію «підшарового» гасіння пожеж нафтопродуктів у резервуарах із великою місткістю. У праці [6] проаналізовано властивості компресійної піни й технологічні параметри її генерування, проте не вивчено поведінки піни в умовах взаємодії з нафтопродуктами. У роботі [7] досліджено вплив швидкості руху піни в трубопроводах, зокрема на прямих ділянках і вигинах, оскільки її поведінка відрізняється від моделі водного потоку. Піна є газорідним двофазним потоком із неньютонівськими властивостями і стисливістю. Однак дослідження охоплювали лише два типи піни (1% класу А та 3% AFFF), що обмежує можливість узагальнення отриманих результатів і їх застосування до інших видів піни. Компресійна піна має переваги завдяки своїй структурі, рівномірному розміру бульбашок і високій стійкості, що дає їй змогу залишатися на поверхні та накопичуватися, тим самим підвищуючи ефективність пожежогасіння [7]. У дослідженні [8] представлено оцінку ефективності гасіння пожеж за допомогою системи компресійної піни (CAFS) при різних співвідношеннях компонентів, зокрема 5–12 частин повітря до 1 частини розчину піноутворювача. У праці [9] досліджувалася кратність компресійної піни та визначався вплив рідини (вода, бензин, дизель) на руйнування піни при «підшаровому» подаванні й подаванні на поверхню. Піна показала хороші показники кратності та стійкості, а результати досліджень виявили можливість використання компресійної піни для «підшарового» пожежогасіння.

Проведений аналіз дає змогу стверджувати, що є доцільність виконати дослідження для

визначення впливу різної інтенсивності при подаванні компресійної піни «підшаровим» способом, оптимальних тисків при подачі піни, вивчити вогнегасні властивості компресійної піни в середовищі нафтопродукту, розглянути поведінку компресійної піни різної кратності.

Мета статті (постановка завдання) – визначення впливу різної інтенсивності подавання піни та її кратності «підшаровим» способом.

Виклад основного матеріалу. Для теоретичних досліджень використовували програмний продукт SolidWorks Flow Simulations. Розрахунки проводили для резервуара об'ємом 5000 м³. Розглянемо подавання піни різної інтенсивності й кратності. Необхідна мінімальна інтенсивність подавання піни в резервуар для «підшарового» гасіння становить 28 кг/с, резервуар діаметром 16 м. З урахуванням гідростатичного тиску ця піна подається під тиском 2 атм на виході із сопла. Збільшивши напір до зростання тиску в 3 атм, отримаємо 42 кг/с, відповідно, в 4 атм – 56 кг/с. Тобто ми так збільшимо мінімальну необхідну інтенсивність подачі в 1,5 та 2 рази. Прийmemo температуру дзеркала горіння 433 °К (160 °С). Температура бортів (стінки) на рівні дзеркала горіння 650 °К (377 °С) [10; 11].

На рис. 1 зображено графічну залежність маси піни кратністю 10 (K10) на дзеркалі горіння від часу її подавання й тиску.

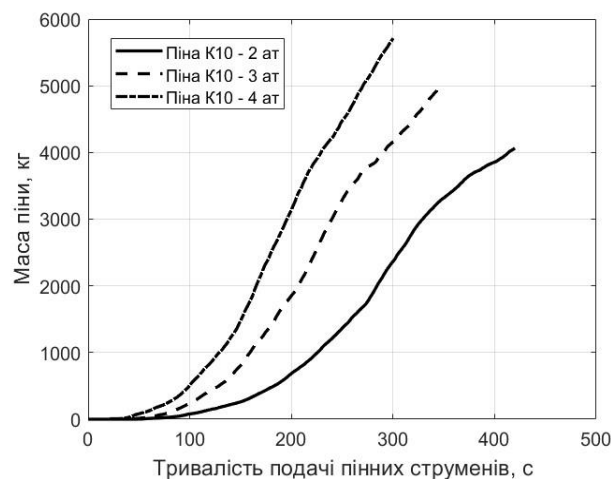


Рис. 1. Графічна залежність маси піни на дзеркалі горіння від часу її подавання й тиску

Як видно з рис. 1, маса пари від піни, яка подається під тиском 2 атм і виходить на поверхню горіння протягом 5 хвилин, приблизно дорівнює 2500 кг. Піна, що подається під тиском 3 атм, досягає цього рівня протягом 220 с, а піна, що подається під тиском 4 атм, – протягом 180 с. Отже, чим більший тиск подачі піни, тим швидший її

вихід. Тобто температуру дзеркала горіння вар «зменшити» від 160°C до 100°C швидше, пропорційно до виходу маси піни значенням 2500 кг. Для тиску 3 атм це буде 220 с, а для тиску 4 атм – 180 с. Також варто збільшити тривалість дослідження моделі після скидання температури, оскільки, як показали дослідження, спочатку іде викид пари, а потім, у міру зменшення середньої температури, уже виходить піна. Для визначення продуктивності виходу піни на поверхню горіння встановимо часовий проміжок 120 с після виходу піни.

Це саме проробимо з піною кратністю 5 (K5). На рис. 2 зображено графічну залежність маси піни K5 на дзеркалі горіння від часу її подавання й тиску.

На рисунку 2 не подано піну K5 під тиском 2 атм, оскільки вона не пробивається на поверхню протягом 5 хвилин. Виходячи із цього, подальші дослідження процесу «підшарового» гасіння проведемо для таких параметрів піни:

- піна K10 – 3 атм 220 с + 120 с;
- піна K10 – 4 атм 180 с + 120 с;
- піна K5 – 3 атм 285 с + 120 с;
- піна K5 – 4 атм 245 с + 120 с.

Результати моделювання представлені на рис. 3–9.

Графічна залежність масових витрат піни K10 і пари на виході з резервуара від часу при тиску подачі 3 атм зображена на рис. 3.

Вихід піни K10 (кратність на вході 5, на виході без впливу температури 10, із підігрівом 12,5) при тиску 3 атм із 225 с до 340 с (рис. 1) становить таке:

$$4335 - 2590 = 1745 \text{ кг (K12,5);}$$

$$Q_m = 15,2 \text{ кг/с;}$$

$$Q_v = 190 \text{ дм}^3/\text{с;}$$

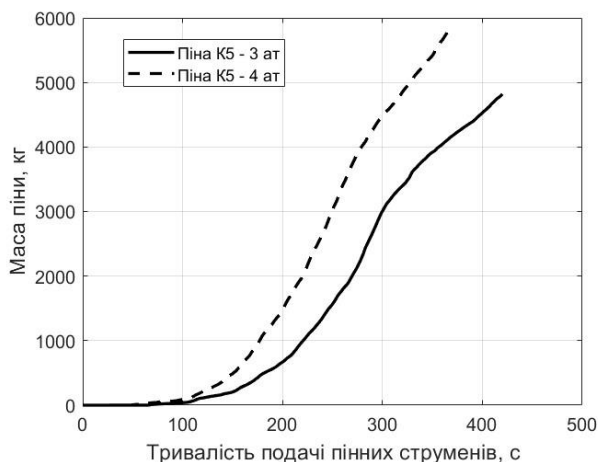


Рис. 2. Графічна залежність маси піни K5 на дзеркалі горіння від часу її подавання й тиску

$$Q_m - \text{масова витрата піни, кг/с;}$$

$$Q_v - \text{об'ємна витрата піни, дм}^3/\text{с.}$$

Час умовного гасіння (досягнення висоти шару піни 100 мм на дзеркалі, $V = 35 \text{ м}^3$) становить таке: $35/0,19 = 184 \text{ с.}$

Повний час гасіння: $225 + 184 = 409 \text{ с.}$

Графічна залежність масових витрат піни K10 і пари на виході резервуара від часу при тиску подачі 4 атм зображена на рис. 4.

Вихід піни K10 (кратність на вході 5, на виході без впливу температури 10, із підігрівом 12,5) при тиску 4 атм із 200 с до 300 с (рис. 1) становить таке:

$$5688 - 3142 = 2546 \text{ кг (K12,5);}$$

$$Q_m = 25,5 \text{ кг/с;}$$

$$Q_v = 318 \text{ дм}^3/\text{с.}$$

Час умовного гасіння (досягнення висоти шару піни 100 мм на дзеркалі, $V = 35 \text{ м}^3$) становить таке: $35/0,32 = 110 \text{ с.}$

Повний час гасіння: $200 + 110 = 310 \text{ с.}$

Графічна залежність масових витрат піни K5 і пари на виході резервуара від часу при тиску подачі 3 атм зображена на рис. 5.

Вихід піни K5 (кратність на вході 2,5, на виході без впливу температури 5, із підігрівом 6,25) при тиску 3 атм із 280 с до 420 с (рис. 1) становить таке:

$$4800 - 2341 = 2459 \text{ кг (K6,25);}$$

$$Q_m = 17,6 \text{ кг/с;}$$

$$Q_v = 110 \text{ дм}^3/\text{с.}$$

Час умовного гасіння (досягнення висоти шару піни 100 мм на дзеркалі, $V = 35 \text{ м}^3$) становить таке: $35/0,110 = 318 \text{ с.}$

Повний час гасіння: $280 + 318 = 598 \text{ с.}$

Графічна залежність масових витрат піни K5 і пари на виході резервуара від часу при тиску подачі 4 атм зображена на рис. 6.

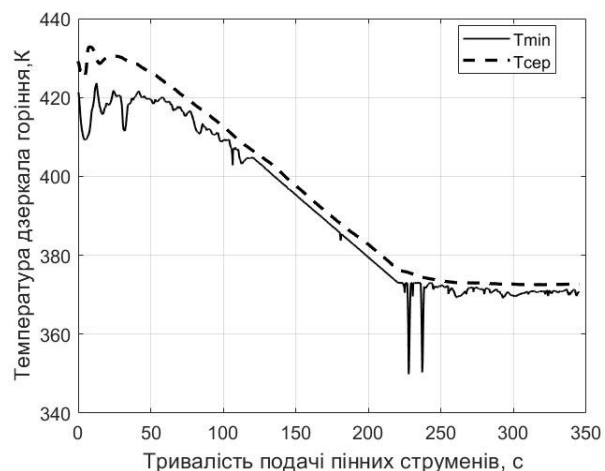


Рис. 3. Температура середовища на дзеркалі горіння (піна K10, 3 атм)

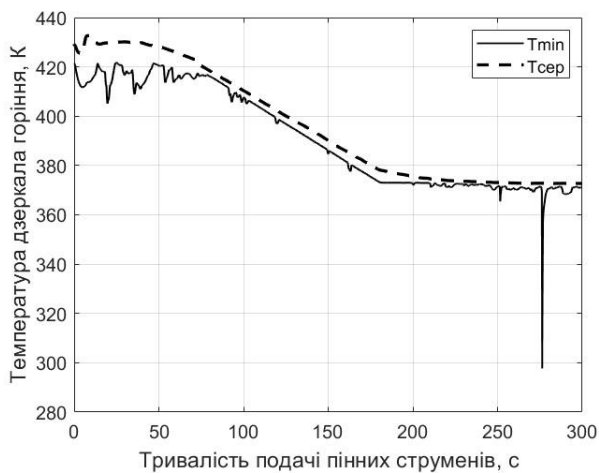


Рис. 4. Температура середовища на дзеркалі горіння (піна K10, 4 атм)

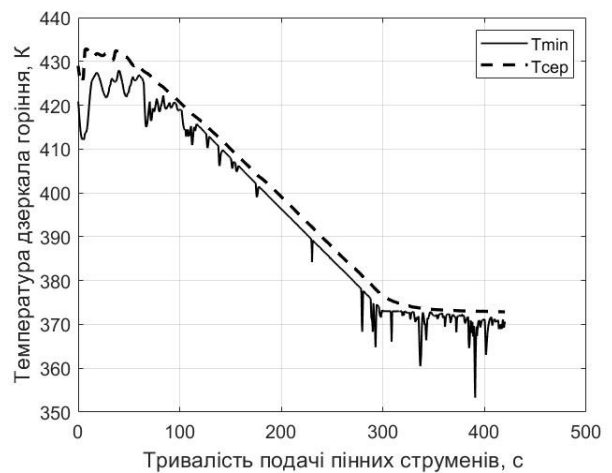


Рис. 5. Температура середовища на дзеркалі горіння (піна K5, 3 атм)

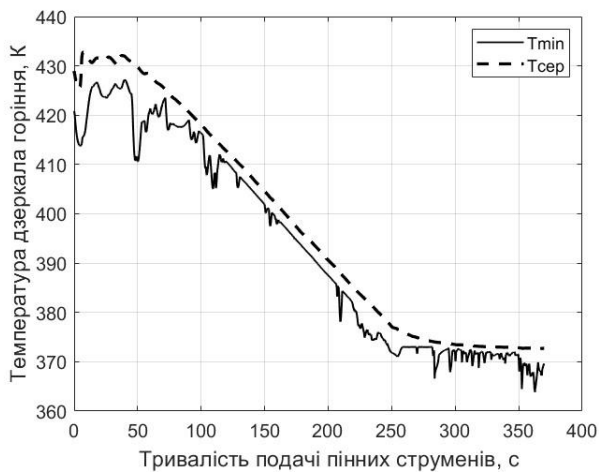


Рис. 6. Температура середовища на дзеркалі горіння (піна K5, 4 атм)

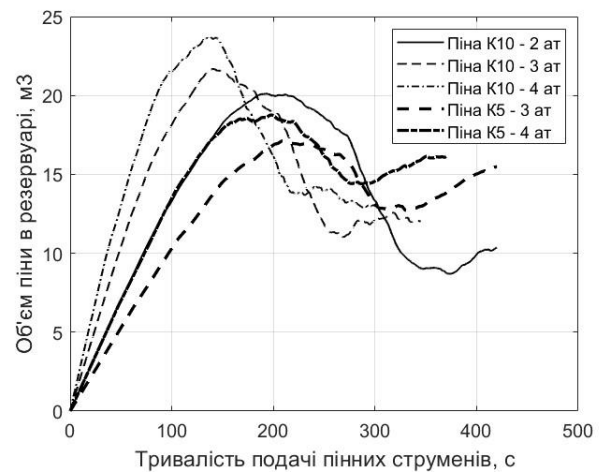


Рис. 7. Графічна залежність об'єму піни в резервуарі від часу при різній кратності піни й тиску

Вихід піни K5 (кратність на вході 2,5, на виході без впливу температури 5, із підігрівом 6,25) при тиску 4 атм із 250 с до 370 с (рис. 1) становить таке:

$$5893 - 3000 = 2893 \text{ кг (K6,25);}$$

$$Q_m = 24,1 \text{ кг/с;}$$

$$Q_v = 150,7 \text{ дм}^3/\text{с.}$$

Час умовного гасіння (досягнення висоти шару піни 100 мм на дзеркалі, $V = 35 \text{ м}^3$) становить таке:

$$35/0,151 = 232 \text{ с.}$$

$$\text{Повний час гасіння: } 250 + 232 = 482 \text{ с.}$$

Результати, отримані внаслідок моделювання, розміщені в таблиці 1.

Визначення об'єму додаткового витіснення бензину. Додаткове витіснення бензину, крім його розширення від прогріву, відбувається ще й за рахунок об'єму піни, яка знаходиться в резервуарі.

На рис. 7 представлено графічну залежність об'єму піни в резервуарі від часу при різній кратності піни й тиску.

Як бачимо з рис. 7, максимальне значення об'єму піни в резервуарі становить 20–24 м³ у випадку піни K10 і 17–19 м³ у випадку піни K5. Тобто вплив різниці в об'ємах піни на витіснення бензину незначний. Однак різна охолоджувальна здатність піни з різними параметрами теж впливатиме на об'єм витіснення бензину.

На рис. 8 представлено енергію конвективного теплового потоку для піни з різними параметрами залежно від тривалості подачі струменів.

Як видно з рис. 8, охолоджувальна здатність пінних струменів є різною. Вона залежить від параметрів піни, продуктивності і тривалості подавання. Варто відмітити, що охолоджувальна здатність піни K5 є кращою за K10.

Результати дослідження моделі

Піна	Час подавання до гасіння, с	Витрати піни, кг	Витрати піноутворювача, кг
K10 – 3 атм	410	17220	1377
K10 – 4 атм	310	17360	1389
K5 – 3 атм	598	25116	4019
K5 – 4 атм	482	26992	4319

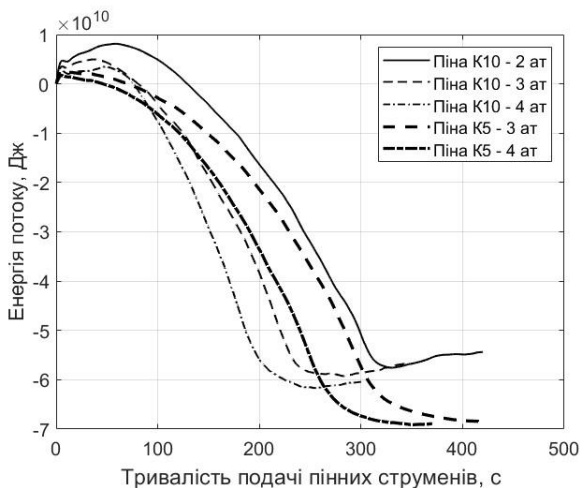


Рис. 8. Залежність енергії конвективного теплового потоку від часу при різних кратності піни й тиску

На рис. 9 представлено залежність маси бензину в резервуарі від тривалості подавання пінних струменів із різними параметрами.

Як видно з рис. 9, маса бензину в резервуарі зменшується лише протягом перших 100 с і залежить від кратності піни. Надалі весь витіснений бензин повертається до попереднього рівня внаслідок його охолодження. З рис. 9 видно вплив кратності піни на витіснення бензину. Чим вища кратність піни, тим більше бензину витісняється з резервуара.

Додатковий об'єм, який варто виділити в процесі гасіння пожежі, визначаємо за формулою:

$$V_{\text{доп}} = \frac{M_1 - M_2}{\rho_{\text{сеп}}}, \quad (1)$$

де M_1 – кінцева маса бензину на момент закінчення прогріву, кг;

M_2 – нижнє значення маси бензину при подаванні протягом перших 100 с при різних значеннях кратності, кг. Для піни K10 значення M_2 становить 3677950 кг, а для піни K5 значення M_2 – 3698730 кг, згідно з рис. 9;

$\rho_{\text{сеп}}$ – середнє значення густини бензину, кг/м³.

Значення деяких показників взято з досліджень [12]:

1) у випадку використання піни K10 $V_{\text{доп}}$ становить 51 м³;

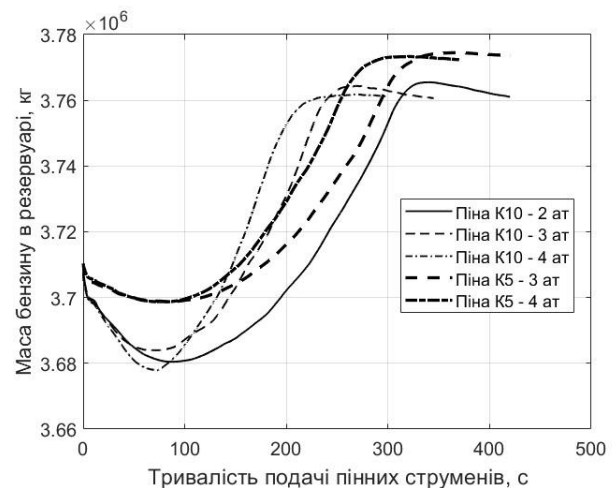


Рис. 9. Графічна залежність маси бензину в резервуарі від часу при різних кратності піни й тиску

2) у випадку використання піни K5 $V_{\text{доп}}$ становить 20 м³.

Отже, з урахуванням попереднього прогріву бензину під час його горіння протягом 30 хв необхідний резервний об'єм становить:

$$V_{\text{рез}} = V_1 + V_{\text{доп}} \quad (2)$$

1) у випадку гасіння піною K10 $V_{\text{рез}}$ становить 701 м³ (12,7%);

2) у випадку гасіння піною K5 $V_{\text{рез}}$ становить 670 м³ (12,1%).

Із цього робимо висновок, що використання піни K5 для «підшарового» гасіння пожежі в резервуарах із паливом є недоцільне.

Піна K10 повинна подаватися з максимальною можливою продуктивністю, оскільки її подача визначає як час гасіння, так й об'єм додаткового витіснення бензину.

Висновки. Згідно з теоретичним дослідженням, яке проведено в програмному продукті SolidWorks Flow Simulations, робимо такі висновки:

1. На гасіння резервуару з нафтопродуктом за допомогою піни K5 витрачено 4019 кг і 4319 кг піноутворювача при тиску в 3 атм і 4 атм відповідно, що становить у 3 рази більше, ніж при використанні піни K10 (1377 кг і 1389 кг при тих самих тисках). Також відрізняється й час

гасіння: при подаванні піни К5 час гасіння становить 598 с і 482 с при тисках 3 атм і 4 атм відповідно, що є на 188 с і 172 с більше, ніж при використанні піни К10 (410 с і 310 с при тих самих тисках). Отже, звідси випливає, що подавання піни К5 є економічно невигідним і займає більше часу.

2. Використання піни кратністю 10 для «підшарового» гасіння пожежі є значно ефективніше від піни кратністю 5. Чим вища кратність і продуктивність подачі піни, тим вищою буде ефективність гасіння. Необхідний резервний об'єм резервуара у випадку тривалості горіння 30 хв до початку подачі піни К10 і продуктивністю 56 кг/с становить близько 13%.

Список літератури

1. Amuay tragedy English Wikipedia. 2012, 25 august. https://en.wikipedia.org/wiki/Amuay_tragedy.
2. Внаслідок вибуху нафтопроводу в Мексиці загинули десятки людей. *BBC News Україна*. 2019, 19 січня. <https://www.bbc.com/ukrainian/news-46933867>.
3. A huge fire at a Texas chemical plant is out, 4 days after it started. *CNN*. 2019, 17 July. <https://edition.cnn.com/2019/03/20/us/deer-park-itc-plant-fire-Wednesday/index.html>.
4. Войтович Т. М. Вдосконалення технології «підшарового» пожежогасіння в резервуарах з нафтопродуктами : дис. ... д-ра філософії : 261. Львів, 2020. 216 с.
5. Боровиков В. Гасіння пожеж у резервуарах для зберігання нафти та нафтопродуктів. *Пожежна та техногенна безпека*. 2015. № 11(26). С. 28–29.
6. Залежність властивостей компресійної піни від робочих параметрів процесу генерування піни / А. Кодрик, О. Нікулін, О. Тітенко й інші. *Науковий вісник. Серія «Цивільний захист та пожежна безпека»*. 2019. № 1 (1(7)). С. 54–63. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2019.1.54-63>.
7. The research of press drop of compressed air foam flow through the bend / Y. Chen, T. Chen, C. Hu et al. *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*, 81, 012118. 2017. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/81/1/012118>.
8. Rie D.-H., Lee J.-W., Kim S. Class B fire-extinguishing performance evaluation of a compressed air foam system at different air-to-aqueous foam solution mixing ratios. *Applied Sciences*. 2016. № 6 (7). P. 191. <https://doi.org/10.3390/app6070191>.
9. Дослідження стійкості та кратності компресійної піни / Н. Великий, В. Ковалишин, Т. Войтович, П. Пастухов. *Пожежна безпека*. 2023. № 43. С. 34–40. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.43.2023.05>.
10. Пожежна тактика : підручник / П.П. Ключ, В.Г. Палюх, А.С. Пустовой та інші. Харків : Основа, 1998.
11. Довідник керівника гасіння пожеж / за загальною редакцією В.С. Кропивницького. Київ : ТОВ «Літера-Друк», 2016. 320 с.
12. Розроблення технології гасіння компресійною піною підшаровим способом резервуарів з нафтопродуктами / В. В. Ковалишин, Н. Р. Великий, В. В. Ковалишин та інші. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Вип. 3. № 10 (129). С. 6–20. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.305684>.

References

1. Amuay tragedy (2012). English Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Amuay_tragedy. [in English].
2. BBC News Ukraine (2019). Vnaslidok vybukhu naftoprovodu v Meksytsi zahynuly desiatky liudei [As a result of the oil pipeline explosion in Mexico, dozens of people died]. Retrieved from: <https://www.bbc.com/ukrainian/news-46933867>. [in Ukrainian]
3. A huge fire at a Texas chemical plant is out, 4 days after it started. (2019, 17 July). CNN. <https://edition.cnn.com/2019/03/20/us/deer-park-itc-plant-fire-Wednesday/index.html>. [in English].
4. Voitovych, T. M. (2020). Vdoskonalennia tekhnolohii «pidsharovoho» pozhezhohasinnia v rezervuarakh z naftoproduktamy [Improvement of the Subsurface Extinguishing Technology in Tanks with Petroleum Products]. Qualifying scientific work on the rights of the manuscript, Lviv. [in Ukrainian]
5. Borovikov, V. (2015). Hasinnia pozhezh u rezervuarakh dlia zberihannia nafty ta naftoproduktiv [Extinguishing fires in oil and petroleum products storage tanks]. *Fire and technological safety*, 11(26), 28–29. [in Ukrainian]
6. Kodryk, A., Nikulin, O., Titienko, O., Kurtov, A., & Shakhov, S. (2019). Dependence of compression foam properties from working parameters of foam generation process. *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*, 1(1(7)), 54–63. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2019.1.54-63>. [in Ukrainian]
7. Chen, Y., Chen, T., Hu, C., Fu, X. C., Bao, Z. M., Zhang, X. Z., & Xia, J. J. (2017). The research of press drop of compressed air foam flow through the bend. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 81, 012118. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/81/1/012118>. [in English].
8. Rie, D.-H., Lee, J.-W., & Kim, S. (2016). Class B fire-extinguishing performance evaluation of a compressed air foam system at different air-to-aqueous foam solution mixing ratios. *Applied Sciences*, 6(7), 191. <https://doi.org/10.3390/app6070191>. [in English].
9. Velykyi, N., Kovalyshyn, V., Voitovych, T., & Pastukhov, P. (2023). Doslidzhennia stiikosti ta kratnosti kompresiinoi piny [Research of stability and expansion of compression foam]. *Fire Safety*, 43, 34–40. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.43.2023.05>. [in Ukrainian]
10. Klus, P., Palukh, V., Pustovoi, A., Senchukhin, Yu., Sirovoi, V. (1998). Pozhezhna taktyka [Fire tactics]. Kharkiv: OSNOVA. [in Ukrainian]

11. Handbook of the head of fire fighting. (2016). Dovidnyk kerivnyka hasinnia pozhezh [According to the general edition] Kropivnitsky V. Kyiv: Ltd «Litera-Druk», 320. [in Ukrainian]

12. Kovalyshyn, V., Velykyi, N., Kovalyshyn, V., Voitovych, T., Bun, R., Novitskyi, Y., & Firman, V. (2024). Rozroblennia tekhnolohii hasin-

nia kompresiinoiu pinoiu pidsharovym sposobom rezervuariv z naftoproduktamy [Devising technology for extinguishing oil tanks using compressed foam by sub-layer technique]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(10 (129)), 6–20. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.305684>. [in Ukrainian]

© В. В. Ковалишин, Н. Р. Великий, Вол. В. Ковалишин, А. С. Лин, П. В. Пастухов, А. Є. Великий, 2024.

Науково-методична стаття.

Надійшла до редакції 25.10.2024.

Прийнято до публікації 18.12.2024.



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.45.2024.03>

А. Ф. Гаврилюк¹, М. О. Гайдук²

¹Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
м. Львів, Україна

²Аварійно-рятувальний загін спеціального призначення ГУ ДСНС України
у Хмельницькій області,
м. Хмельницький, Україна

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8727-9950> – А. Ф. Гаврилюк

<https://orcid.org/0009-0002-5248-322X0> – М. О. Гайдук

✉ gavrilyk3@ukr.net

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ВОГНЕЗАХИСНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ДЕРЕВ'ЯНИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПРИ ЗАМІНІ ВОГНЕЗАХИСНОГО ЗАСОБУ

Вогнезахисне оброблення є одним із ефективних способів забезпечення належного рівня пожежної безпеки. Вимоги до цього процесу регулюються Правилами з вогнезахисту, державними стандартами, регламентами й ще чинними стандартами. Найбільш поширеним є вогнезахисне оброблення дерев'яних конструкцій, оскільки деревина є доступним, ефективним та екологічним матеріалом, проте з високими показниками горючості, займистості, поширення полум'я та димоутворювальної здатності. Для вогнезахисту деревини найчастіше застосовують вогнезахисні засоби для просочування. Аналіз процесу перевірки ефективності вогнезахисту створив передумови стверджувати, що вогнезахисні засоби можуть бути не сумісні між собою, що призводить до зниження показників вогнезахисної ефективності. З огляду на вищеописаний факт з урахуванням чинних і новоприйнятих стандартів, дослідження показників вогнезахисної ефективності дерев'яних будівельних конструкцій після виконання повторних робіт із вогнезахисного оброблення із заміною вогнезахисного засобу є актуальним завданням.

Метою роботи є дослідження показників вогнезахисної ефективності дерев'яних будівельних конструкцій після виконання повторних робіт із вогнезахисного оброблення із заміною вогнезахисного засобу.

Для визначення показників вогнезахисної ефективності дерев'яних будівельних конструкцій при заміні вогнезахисного засобу паралельно застосовано чинні методи й методи, що набудуть чинності з березня 2025 року. Для проведення експериментальних досліджень використано метод для визначення групи вогнезахисної ефективності дерев'яних конструкцій, метод контролювання за температурою займання й метод контролювання за ознакою самостійного горіння.

Для проведення експериментальних досліджень виготовлено зразки із сосни, що просочені вогнезахисними засобами ДСА-1, Біофлейм, Ecossept 450-1, Фаєр-оф окремо кожним засобом і надалі повторно просочені в різних комбінаціях заміни вогнезахисного засобу.

Випробування з визначення втрати маси деревини виявили, що втрати маси для зразків із заміною вогнезахисного засобу щодо втрати маси зразків, оброблених одним вогнезахисним засобом, збільшилися в діапазоні від 0,5% до 4,6%, що призвело до зниження групи вогнезахисної ефективності з I до II, свідчить про негативний вплив заміни вогнезахисного засобу.

За результатами випробувань з контролю за ознакою самостійного горіння, непридатною для подальшої експлуатації вважається низка зразків, оскільки відсоток зрізів, що піддавалися випробуванням, підтримували самостійне полуменеве горіння й (або) тління в діапазоні від 20% до 50%.

За допомогою порівняння визначених температур займання з температурою займання сосни, яка не піддавалася обробленню засобами вогнезахисту, виявлено, що для всіх зразків температура займання підвищилася. Підвищення відбулося в діапазоні від 5 до 85 °С.

Отже, експериментальні дослідження показників вогнезахисної ефективності дерев'яних будівельних конструкцій при заміні вогнезахисного засобу показали, що заміна вогнезахисного засобу впливає на втрату маси (збільшення втрати від 0,5 до 4,6%), ознаки самостійного горіння (підтримання горіння більше ніж 20%) і температуру займання. При застосованих комбінаціях вогнезахисних засобів

переважно відбулося зниження показників ефективності вогнезахисту. В окремих випадках показники залишилися на незмінному рівні або покращилися. Дослідження дають підстави стверджувати, що вогнезахисні засоби можуть бути не сумісними при проведенні повторного вогнезахисного оброблення, оскільки призводять до зниження вогнезахисної ефективності. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення вогнезахисного засобу для деревини, що буде придатним для заміни й не буде призводити до зниження показників вогнезахисної ефективності.

Ключові слова: показники вогнезахисної ефективності, заміна вогнезахисного засобу, вогнезахисне оброблення, вогнезахист, просочування.

A. F. Havryliuk¹, M. O. Haiduk²

*¹Lviv State University of Life Safety,
Lviv, Ukraine*

*²Emergency rescue detachment of special purpose of the State Emergency Service of Ukraine
in Khmelnytskyi region*

EXPERIMENTAL STUDY OF FIRE PROTECTION EFFICIENCY INDICATORS OF WOODEN BUILDING STRUCTURES WHEN REPLACING FIRE RETARDANT

Fire protection treatment is one of the effective ways to ensure the proper level of fire safety. The requirements for this process are regulated by the Fire Protection Rules, state standards, regulations and still valid standards of the category. The most common is fire protection treatment of wooden structures, since wood is an affordable, effective and environmentally friendly material, but with high rates of combustibility, flammability, flame spread and smoke generation. Fire protection agents for impregnation are most often used for fire protection of wood. Analysis of the process of checking the effectiveness of fire protection created the prerequisites to state that fire protection agents may not be compatible with each other, which leads to a decrease in fire protection efficiency. Considering the fact described above, taking into account current and newly adopted standards, the study of fire protection efficiency indicators of wooden building structures after repeated fire protection treatment with replacement of the fire protection agent is an urgent task.

The purpose of the work is to study the fire protection efficiency indicators of wooden building structures after repeated fire protection treatment with replacement of the fire protection agent.

To determine the fire protection efficiency indicators of wooden building structures when replacing a fire retardant, current methods and methods that will come into force from March 2025 were used in parallel. For experimental research, the following methods were used: "Method for determining the fire protection efficiency group of wooden structures", "Method of controlling by ignition temperature" and "Method of controlling by the sign of spontaneous combustion".

For experimental research, samples were made of pine that were impregnated with fire retardants DSA-1, Bioflame, Ecossept 450-1, Fire-of separately with each agent and subsequently re-impregnated in various combinations of replacing the fire retardant.

Tests to determine the mass loss of wood showed that the mass loss indicators for samples with the replacement of the fire retardant in relation to the mass loss indicators of samples treated with one fire retardant increased in the range from 0.5% to 4.6%, which led to a decrease in the fire retardant efficiency group from I to II and indicates the negative impact of replacing the fire retardant.

According to the results of tests according to the "Method of control by the sign of spontaneous combustion", a number of samples are considered unsuitable for further operation, since the percentage of sections that were tested supported spontaneous flame combustion and (or) smoldering in the range from 20% to 50%.

A comparison of the determined ignition temperature indicators with the ignition temperature of pine that was not treated with fire retardants revealed that the ignition temperature increased for all samples. The increase occurred in the range from 5 to 85 °C.

Experimental studies of the fire protection efficiency of wooden building structures when replacing the fire retardant have shown that replacing the fire retardant affects the mass loss indicators (increase in loss from 0.5 to 4.6%), signs of spontaneous combustion (maintenance of combustion of more than 20%), and ignition temperature. With the used combinations of fire retardants, a decrease in fire protection efficiency indicators mainly occurred. In some cases, the indicators remained at the same level or improved. The conducted studies give grounds to argue that fire retardants may not be compatible when performing repeated fire retardant treatment, since they lead to a decrease in fire protection efficiency. Further research should be directed to the development of a fire retardant for wood that will be suitable for replacement and will not lead to a decrease in fire protection efficiency indicators.

Key words: fire protection efficiency indicators, replacement of a fire retardant, fire retardant treatment, fire protection, impregnation.

Постановка проблеми. Деревина є ефективним та екологічним матеріалом, що має виправдані переваги. Однак за неналежних умов або в умовах пожежі конструкції з дерева швидко втрачають несучу здатність. Через високі показники горючості, займистості, димоутворювальної здатності й поширення полум'я застосування деревини обмежується нормами та правилами щодо пожежної безпеки, а саме застосування можливе за умови здійснення вогнезахисного оброблення. Упродовж багатьох років розробляються нові речовини та методи для вогнезахисту й удосконалюються наявні. Для збереження та покращання характеристик деревини застосовують різні просочувальні засоби, зокрема й вогнезахисні (вогнебіозахисні) засоби. Правильний підбір і застосування просочувальних вогнезахисних засобів забезпечує підвищення вогнестійкості або зниження показників пожежної небезпеки деревини. Ефективність вогнезахисту залежить від багатьох факторів, а саме: хімічного складу вогнезахисного засобу, способу його нанесення, здатності засобу до ефективного проникнення в деревину, вологості деревини, розподілу засобу по деревині та глибини просочування, а також від перевірки відповідності вогнезахисту й часу експлуатації вогнезахисту [1; 2]. Кожен із сертифікованих вогнезахисних засобів установлює прогнозований строк придатності вогнезахисного просочування – це строк, упродовж якого вогнезахисний засіб після його застосування зберігає свою вогнезахисну ефективність. В умовах високої конкуренції вогнезахисних засобів суб'єкти господарювання все частіше здійснюють заміну вогнезахисного засобу при повторних роботах із вогнезахисту, що призводить до негативних результатів під час проведення перевірки ефективності вогнезахисту комісією, яка утворюється після завершення виконання робіт із вогнезахисного оброблення. Дослідження вищеприведеного факту з урахуванням чинних і новоприйнятих стандартів є потенційною проблемою, що потребує вирішення.

Аналіз останніх досягнень та публікацій. Фактори, що впливають на ефективність вогнезахисту, досліджувала низка науковців, що відбито в багатьох публікаціях. Зокрема, у науковій роботі [3] автор описує закономірності впливу якісного й кількісного складу водних вогнебіозахисних речовин на процеси займання, розповсюдження та припинення горіння целюлозовмісних матеріалів деревини, тканин, паперу, очерету.

За допомогою методики, яка описана в праці [4], науковці виявили, що істотний охолоджувальний ефект від використання антипіренів для

вогнезахисту деревини, оскільки інтервал часу від початку теплового впливу до моменту початку полум'яного горіння для вогнезахисної деревини у два з половиною рази більший, ніж для невогнезахисної.

Автори Чернуха А. А. й інші [5] дослідили вплив особливостей деревини різних порід на ефективність вогнезахисних просочувальних засобів на прикладі дуба й засобу ДСА. У результаті досліджень вони встановили, що стандартний метод досліджень вогнезахисної ефективності з використанням виключно сосни не може надати справедливі дані щодо ефективності засобу до інших порід деревини.

У роботі [6] науковці розробили й дослідили ефективність вогнезахисних покриттів для дерев'яних конструкцій на основі силікату натрію, декстрину й оксидів металів магнію і титану, у результаті чого отримано висновки, що температуростійкі оксиди металів, декстрин і силікат натрію в складі покриття підвищують вогнестійкість – під час дії вогню, а силікат натрію збільшує його атмосферостійкість у природних умовах.

Дослідники Веселівський Р. Б. і Смоляк Д. В. [7] обґрунтували, що категорія використання вогнезахисних матеріалів має обиратися залежно від умов навколишнього середовища (усередині приміщень, частково захищені простори й приміщення чи відкритий простір). Представлено фактори, що впливають на термін придатності та експлуатаційну надійність вогнезахисних покриттів.

Автори в праці [8] розробили композицію вогнезахисного покриття, що спучується, яке утворює на поверхні що «захищається», тонкий непрозорий шар, який перешкоджає запаленню й поширенню полум'я по дерев'яній конструкції. За основу покриття взято рідке скло, тому що воно має такі позитивні характеристики, як доступність, пов'язано з проявом рідким склом в'язучих властивостей – здатності до мимовільного твердіння з утворенням штучного силікатного каменю.

Заміна вогнезахисного засобу є поширеним явищем, що спричинене економічними чинниками, збільшенням конкуренції вогнезахисних засобів і необхідністю періодичного проведення робіт із повторного вогнезахисту. Згідно з працею [2], в Україні застосовується понад 30 різних сертифікованих вогнезахисних засобів. Кожен із цих засобів має унікальну формулу та свій механізм вогнезахисту. Дослідження суті методу випробувань визначення вогнезахисної ефективності, методу визначення групи горючості речовин і матеріалів, а також розгляд вимог щодо випробувань вогнезахисних засобів, які використовують

у країнах Європейського Союзу, описано в працях [9; 10]. У ДСТУ 9291:2024 «Захист від пожежі. Вогнезахист будівельних конструкцій. Загальні вимоги та методи контролювання під час експлуатації об'єктів вогнезахисту» встановлено вимоги до методів контролювання вогнезахисних засобів (покривів і просочень), нанесених на об'єкт вогнезахисту (дерев'яні, металеві й бетонні конструкції), для подальшого їхнього експлуатування.

Аналіз даних літературних джерел дає можливість стверджувати, що науковці зосереджують дослідження на окремих вогнезахисних засобах, впливі навколишнього середовища на вогнезахисну ефективність засобів, впливу вогнезахисних засобів на показники пожежної небезпеки деревини. Проте ці роботи не містять досліджень щодо впливу повторних робіт із вогнезахисту на вогнезахисну ефективність з урахуванням заміни вогнезахисного засобу, так залишаючи цей факт без достатньої уваги.

Мета статті (постановка завдання) полягає у виявленні показників вогнезахисної ефективності дерев'яних будівельних конструкцій, що зазнають впливу після виконання повторних робіт із вогнезахисного оброблення із заміною вогнезахисного засобу.

Для цього необхідно розв'язати такі завдання:

- провести експериментальні дослідження показників вогнезахисної ефективності дерев'яних будівельних конструкцій, що зазнають впливу після виконання повторних робіт із вогнезахисного оброблення із заміною вогнезахисного засобу.

- виявити динаміку зміни показників вогнезахисної ефективності дерев'яних будівельних конструкцій, що зазнають впливу після виконання повторних робіт із вогнезахисного оброблення із заміною вогнезахисного засобу.

Методи дослідження. Станом на листопад 2024 року вогнезахисна ефективність вогнезахисного засобу для просочування визначається шляхом визначення втрати маси деревини просоченої вогнезахисним засобом при вогневому випробуванні в умовах, що сприяють акумуляції тепла. Цей метод застосовують для визначення групи вогнезахисної ефективності й під час проведення сертифікаційних випробувань [11]. Для перевірки відповідності вогнезахисту після виконання робіт на діючих об'єктах ключовим є застосування експрес-методу [12; 13]. Ці методи мають суттєві недоліки, проте вони є чинними. В основі цих методів лежить утрата маси зразків, оброблених вогнезахисним розчином, і наявність самостійного горіння або тління після видалення джерела вогню. З березня 2025 року набуває чинності

національний стандарт ДСТУ 9291:2024 «Захист від пожежі. Вогнезахист будівельних конструкцій. Загальні вимоги та методи контролювання під час експлуатації об'єктів вогнезахисту». У цьому стандарті встановлено вдосконалені методи контролювання вогнезахисних засобів, нанесених на об'єкт вогнезахисту, які дають змогу виявити непридатність вогнезахисних засобів, нанесених на об'єкт вогнезахисту, для подальшого експлуатування.

Для контролювання придатності просоченої деревини для подальшого експлуатування будуть застосовуватися метод контролювання за температурою займання (метод 5.1.1) і метод контролювання за ознакою самостійного горіння (метод 5.1.2). Відповідно до цих методів, будівельні конструкції з деревини, просочені певним вогнезахисним засобом, вважаються непридатними для подальшої експлуатації, якщо виконується одна з таких умов:

- значення температури займання, отримане за методом 5.1.1, є меншим за величину, яка дорівнює 85% температури займання, що наведена підприємством-виробником у регламенті робіт із вогнезахисту, технічних умовах або результатах випробування на відповідний вогнезахисний засіб, або меншим ніж 355 °C (у разі відсутності значення температури займання в регламенті з вогнезахисту, технічних умовах або результатах випробування на відповідний вогнезахисний засіб);

- більше ніж 10% зразків, які випробувано за методом 5.1.2, підтримують самостійне полум'яне горіння й (або) тління.

Ураховуючи методи випробувань, визначені в чинних нормативних документах і тих, що будуть чинними, для експериментального дослідження показників вогнезахисної ефективності дерев'яних будівельних конструкцій при зміні вогнезахисного засобу застосовані ці методи паралельно.

Ознаки суттєвого впливу на показники ефективності вогнезахисту при заміні вогнезахисного засобу вперше виявлено при експериментальних дослідженнях у 2021 році [14]. З метою подальших досліджень у 2021 році підібрано вогнезахисні засоби з урахуванням проведеного аналізу найбільш частого застосування різновидів сертифікованих вогнезахисних засобів по Україні. Відтак для проведення експериментальних досліджень у 2021 році виготовлені зразки із сосни, що просочені вогнезахисними засобами ДСА-1, Біофлейм, Ecossept 450-1, Фаєр-оф окремо кожним. Прогнозований строк придатності вогнезахисного просочування для кожного із цих засобів

становить 3 роки. Зразки зберігалися в закритому, опалювальному й добре провітрянному приміщенні впродовж 3 років. У листопаді 2024 року ці зразки піддані повторному вогнезахисту в різних комбінаціях заміни вогнезахисного засобу. Для кожного варіанта заміни вогнезахисного засобу виготовлено по три зразки та присвоєно відповідну нумерацію (таблиця 1, рисунок 1).



Рис. 1. 48 зразків, що просочені вогнезахисними засобами ДСА-1, Біофлейм, Ecossept 450-1, Фаєр-офф окремо кожним засобом і надалі в різних комбінаціях заміни вогнезахисного засобу

Експериментальні дослідження проведені в атестованій дослідно-випробувальній лабораторії Аварійно-рятувального загону спеціального призначення ГУ ДСНС України у Хмельницькій області.

Визначення втрати маси деревини, обробленої вогнезахисним засобом, при вогневому випробуванні в умовах, що сприяють акумуляції тепла,

проведено відповідно до [11], з використанням установки для визначення вогнезахисної ефективності покриттів і просочень (рисунок 2).

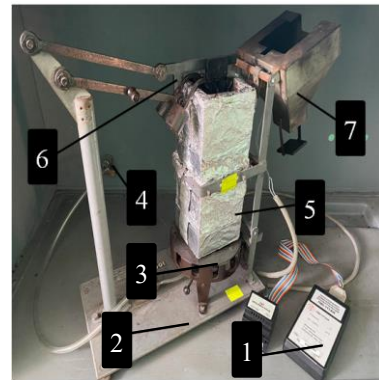


Рис. 2. Зовнішній вигляд установка для визначення вогнезахисної ефективності покриттів і просочень: 1 – ПВІ-111АК Перетворювач вимірювальний інтелектуальний з блоком комутації та носієм інформації мікро SD; 2 – металева підставка; 3 – газовий пальник; 4 – пристрій для регулювання подачі газу; 5 – керамічний короб; 6 – тримач зразка що випробується; 7 – зонт із термопарою

Керамічний короб переводять у горизонтальне положення та запалюють газовий пальник, установлюють висоту полум'я 15–25 см. Після цього керамічний короб установлюють вертикально на підставку, переводять парасольку в робоче положення над коробом і регулюють витрату газу так, щоб температура протягом 5 хв дорівнювала $(200 \pm 5)^\circ\text{C}$, після чого фіксують значення витрати газу за показаннями ротаметра. При досягненні

Таблиця 1

Зразки, що виготовлені для експериментального дослідження показників вогнезахисної ефективності дерев'яних будівельних конструкцій при зміні вогнезахисного засобу

№ з/п	Номер, присвоєний зразку	Назва вогнезахисного засобу, яким проведено перше вогнезахисне оброблення	Назва вогнезахисного засобу, яким проведено друге вогнезахисне оброблення	Кількість виготовлених зразків
1	1	ДСА-1	ДСА-1	3
2	1,1	ДСА-1	Біофлейм	3
3	1,2	ДСА-1	Ecossept 450-1	3
4	1,3	ДСА-1	Фаєр-офф	3
5	2	Біофлейм	Біофлейм	3
6	2,1	Біофлейм	ДСА-1	3
7	2,2	Біофлейм	Ecossept 450-1	3
8	2,3	Біофлейм	Фаєр-офф	3
9	3	Ecossept 450-1	Ecossept 450-1	3
10	3,1	Ecossept 450-1	ДСА-1	3
11	3,2	Ecossept 450-1	Біофлейм	3
12	3,3	Ecossept 450-1	Фаєр-офф	3
13	4	Фаєр-офф	Фаєр-офф	3
14	4,1	Фаєр-офф	ДСА-1	3
15	4,2	Фаєр-офф	Біофлейм	3
16	4,3	Фаєр-офф	Ecossept 450-1	3

температури $(200 \pm 5)^\circ\text{C}$ парасольку відводять і випробуваний зразок, закріплений у тримачі, опускають у керамічний короб і водночас включають секундомір. Потім парасольку повертають у робоче положення. Зразок тримають у полум'ї пальника протягом 2 хв. У ході випробувань контролюють за показаннями ротаметра витрату газу, який повинен дорівнювати раніше фіксованому. Через 2 хв подачу газу в пальник припиняють і залишають зразок у приладі для остигання до кімнатної температури, надалі узагальнюють результати.

Новий метод контролювання за ознакою самостійного горіння (метод 5.1.2), відповідно до ДСТУ 9291:2024 «Захист від пожежі. Вогнезахист будівельних конструкцій. Загальні вимоги та методи контролювання під час експлуатації об'єктів вогнезахисту», фактично є вдосконаленим експрес-методом відповідно до [13]. Для виготовлення зразків, призначених для випробування, із поверхневого шару деревини, просоченої певним вогнезахисним засобом, за допомогою стамески або іншого різального інструмента відбирають проби завтовшки не менше ніж 1 мм. Із відібраних проб створюють зразки для випробування завтовшки $(0,9 \pm 0,1)$ мм і завдовжки не менше ніж 30 мм. Усі зразки по одному в приміщенні без протягів приведені в горизонтальне положення, піддають впливу полум'я сірника протягом 15 с. Після завершення впливу джерела вогню для кожного зразка фіксують наявність самостійного полуменевого горіння й/або тління.

Метод контролювання за температурою займання (метод 5.1.1) передбачає застосування випробувального обладнання, яке наведено в 7.8 [15] (рисунок 3).

Для виготовлення зразків, призначених для випробування, із поверхневого шару деревини, просоченої певним вогнезахисним засобом, за допомогою стамески або іншого різального інструмента відбирають проби завтовшки не менше ніж 1 мм. Із відібраних проб, завтовшки $(0,9 \pm 0,1)$ мм кожна, створюють зразки для випробування масою $(3,0 \pm 0,1)$ г у кількості від 10 до 15. Перед випробуванням зразки кондиціюють у вентильованій сушильній шафі протягом (60 ± 5) хв за температури $(60 \pm 5)^\circ\text{C}$. Нагрівають робочу камеру до температури 500°C . Виймають із камери тримач із контейнером. У контейнер поміщають зразок за проміжок часу не більше ніж 15 с і вводять його в робочу камеру. При цьому зразок має бути встановлено так, щоб тепловий вплив на нього здійснювався з боку, який піддано вогнезахисному оброблянню. Спостерігають за зразком у робочій камері за допомогою дзеркала.

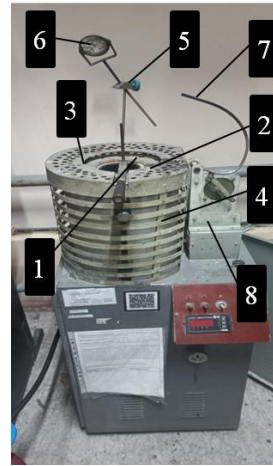


Рис. 3. Установка для визначення температури займання речовин і матеріалів: 1 – керамічні циліндри; 2 – спіральні електронагрівачі; 3 – теплоізоляційний матеріал; 4 – сталевий екран; 5 – тримач зразка; 6 – контейнер; 7 – газовий пальник; 8 – електропривод

Якщо за температури випробування відбувається займання зразка, то випробування припиняють, контейнер зі зразком виймають із камери. Реєструють температуру випробування й наступне випробування проводять із новим зразком за меншої температури (наприклад, на 20°C менше). Якщо протягом 10 хв не відбувається займання зразка або раніше цього проміжку часу повністю припиняється димовидалення, то випробування зупиняють і відмічають відмову. За температуру займання беруть середнє арифметичне двох температур, які відрізняються не більше ніж на 10°C , при одній із яких спостерігається займання трьох зразків, а за іншої – три відмови.

Виклад основного матеріалу. Експериментальні дослідження показників вогнезахисної ефективності дерев'яних будівельних конструкцій при заміні вогнезахисного засобу виявили, що заміна вогнезахисного засобу впливає на показники втрати маси, ознаки самостійного горіння й температури займання.

Збільшення втрати маси зразка призводить до зниження групи вогнезахисної ефективності. Для I групи вогнезахисної ефективності допускається втрата маси зразків до 9%. При втраті маси від 9 до 25% вогнезахисний засіб визначається таким, що забезпечує лише II групу вогнезахисної ефективності.

Випробування з визначення втрати маси деревини показали, що втрати маси для зразків № 1,2; 1,3; 2,2; 3,1; 3,3; 4,1; 4,3 щодо втрати маси зразків, які оброблені одним вогнезахисним засобом, збільшилися в діапазоні від 0,5% до 4,6%, що призвело до зниження групи вогнезахисної ефективності з I до II групи та свідчить про негативний вплив заміни вогнезахисного засобу.

Утрата маси для зразка під № 1,1 збільшилася на 1,4%. Загальна втрата маси не перевищила 9%, що забезпечило збереження I групи вогнезахисної ефективності. Збільшення втрати маси також свідчить про негативний вплив заміни вогнезахисного засобу.

Утрати маси для зразків під № 2,1; 2,3; 3,2; 4,2 зменшилися в діапазоні від 0,2% до 0,6%. Зменшення втрати маси свідчить про покращення показників вогнезахисної ефективності. Динаміку зміни втрати маси подано на рисунку 4, фото зразків після випробувань – на рисунку 5.

Згідно з випробуваннями з контролю за ознакою самостійного горіння, зразки деревини, просочені певним вогнезахисним засобом, вважають непридатними для подальшої експлуатації, якщо більше ніж 10% зразків, які випробувано, підтримують самостійне полуменеве горіння й (або) тління.

За результатами випробувань, непридатними для подальшої експлуатації вважаються зразки № 1,2; 1,3; 2,1; 2,2; 2,3; 3,1; 4,2, оскільки відсоток зрізів, що піддавалися випробуванням, підтримували самостійне полуменеве горіння й (або) тління в діапазоні від 20% до 50%. Загальний вигляд зразків після випробувань подано на рисунку 6.

Узагальнені результати експериментальних досліджень з використанням методу контролювання за ознакою самостійного горіння подано на рисунку 7.

Випробування за температурою займання передбачає визначення температури займання та подальше її порівнювання з величиною, яка дорівнює 85% температури займання, що наведена підприємством-виробником у регламенті робіт із вогнезахисту, технічних умовах або результатах випробування на відповідний

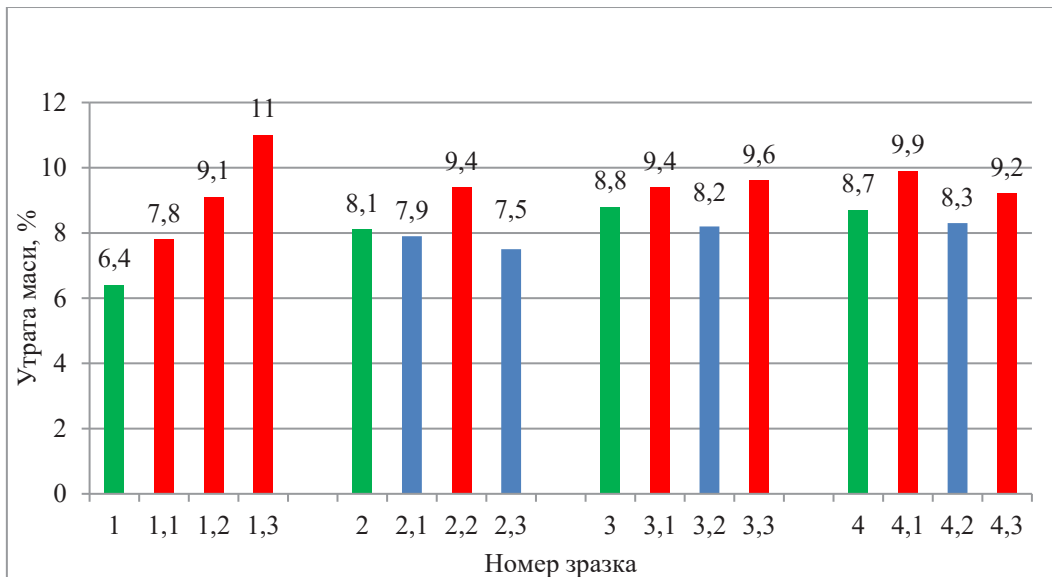


Рис. 4. Динаміка зміни показників утрати маси зразків

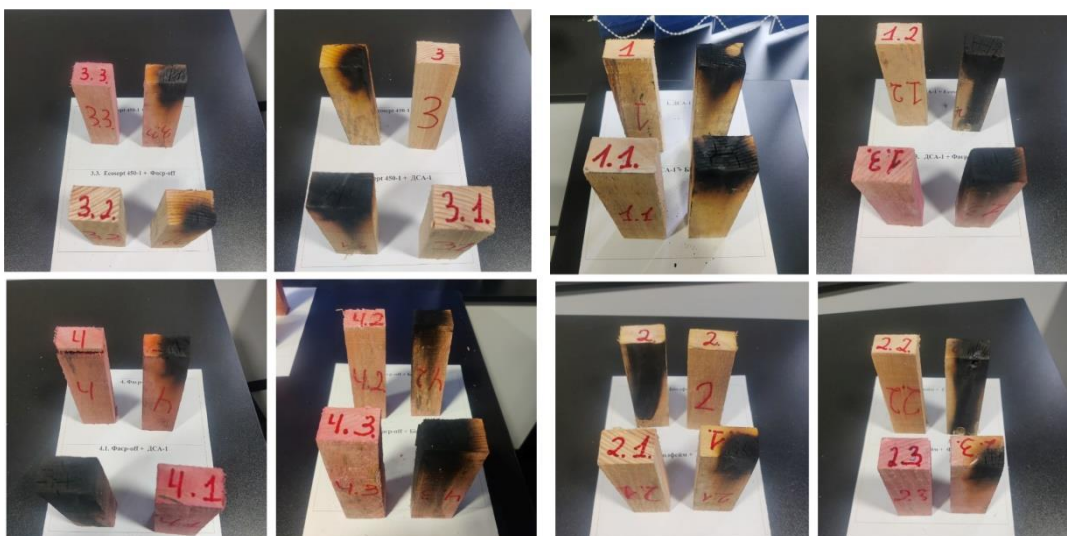


Рис. 5. Фото зразків після експериментальних досліджень із визначення втрати маси

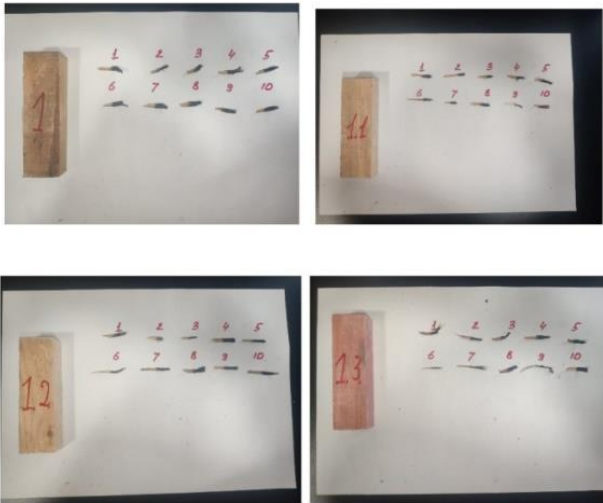


Рис. 6. Фото зразків після експериментальних досліджень з використанням методу контролювання за ознакою самостійного горіння на прикладі зразків № 1–1,3

вогнезахисний засіб, або меншою ніж 355 °С (у разі відсутності значення температури займання в регламенті з вогнезахисту, технічних умовах або результатах випробування на відповідний вогнезахисний засіб).

У результаті аналізу регламентів і відкритих джерел інформації щодо вогнезахисних засобів ДСА-1, Біофлейм, Ecossept 450-1, Фаєр-оф наведених температур займання не знайдено. Варто відзначити, що ці температури можуть бути вказані в технічних умовах або результатах випробування на відповідний вогнезахисний засіб, які відступні у вільному доступі. Відсутність доступу до цих температур унеможливує здійснення об'єктивних висновків за результатами

проведених досліджень. Проте в науково-дослідній роботі [16] досліджено температуру займання деревини сосни, яка не піддавалась обробленню засобами вогнезахисту, і визначено, що ця температура становить 230 °С. З огляду на цю температуру, можемо проаналізувати динаміку зміни температур з урахуванням заміни вогнезахисного засобу. Результати експериментальних досліджень із визначення температури займання наведено на рисунку 8.

Порівнянням визначених температур займання з температурою займання сосни, яка не піддавалась обробленню засобами вогнезахисту, виявлено, що для всіх зразків температура займання підвищилася в діапазоні від 5 до 85 °С.

Експериментальні дослідження з виготовленням зразків, які піддані повторному вогнезахисному обробляння із заміною вогнезахисного засобу, дають підстави стверджувати, що заміна вогнезахисного засобу впливає на основні показники вогнезахисної ефективності: утрату маси, ознаку самостійного горіння й температуру займання. Загалом динаміка зміни основних показників демонструє їх погіршення.

Висновки. На основі отриманих результатів можна припускати, що вогнезахисні засоби можуть бути не сумісними при проведенні повторного вогнезахисного обробляння, оскільки призводять до зниження вогнезахисної ефективності. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення вогнезахисного засобу для деревини, що буде придатним для заміни й не призводитиме до зниження показників вогнезахисної ефективності.

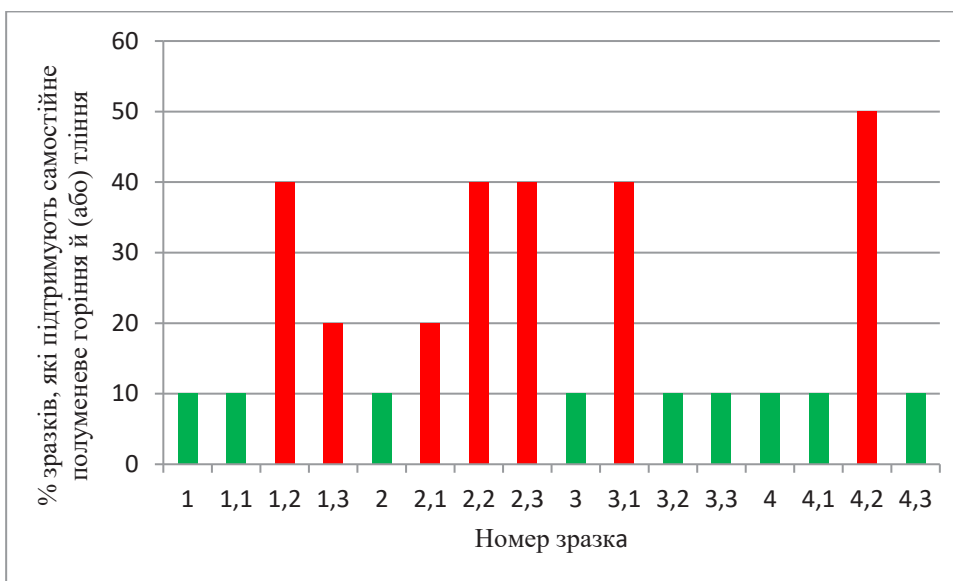


Рис. 7. Результати експериментальних досліджень із використанням методу контролювання за ознакою самостійного горіння

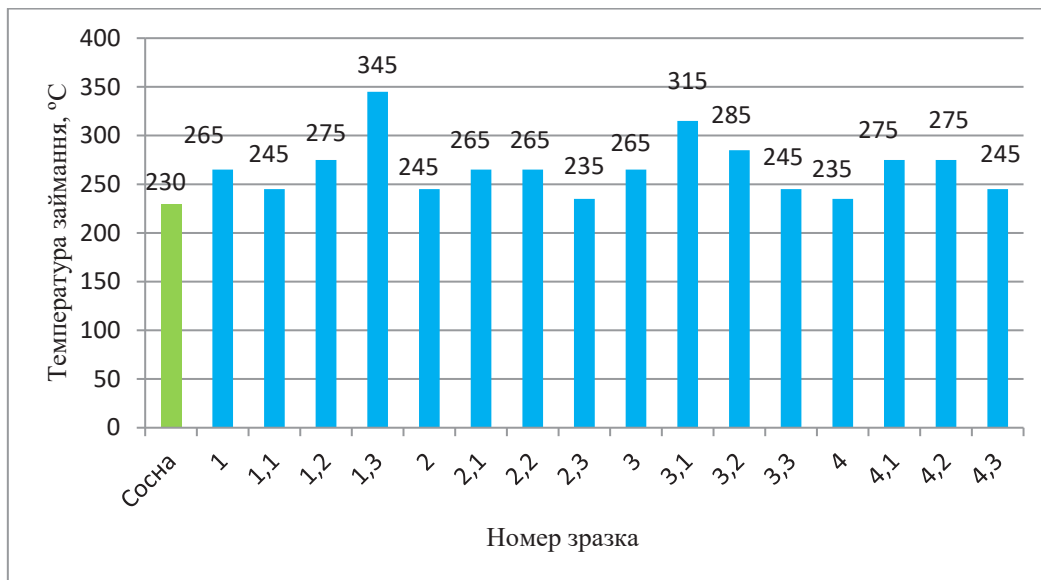


Рис. 8. Результати експериментальних досліджень із визначення температури займання

Список літератури

1. Comparative study between full cell and passive impregnation method of wood preservation for laser incised Douglas fir lumber / M. N. Islam et al. *Wood Sci Technol.* 2008. № 42. P. 343–350.

2. Гайдук М. О., Гаврилюк А. Ф., Яковчук Р. С. Проблемні аспекти визначення вогнезахисту деревини. *Комунальне господарство міст.* 2024. № 182. Т. 1. С. 187–194. DOI: 10.33042/2522-1809-2024-1-182-187-194.

3. Жартовський С. В. Розвиток наукових основ протипожежного захисту об'єктів з пожежним навантаженням із целюлозовмісних матеріалів водними вогнебіозахисними речовинами: дис. ... докт. техн. наук : 21.06.02. Харків, 2018. 348 с.

4. Чумаченко С. М., Жартовський С. В., Тітенко О. М. Методика розроблення математичної моделі охолоджувального ефекту в процесі нагрівання зразка деревини, просоченого водною вогнебіозахисною речовиною. *Науковий вісник НЛТУ України.* 2016. № 26.8. С. 337–347. <https://doi.org/10.15421/40260851>.

5. Чернуха А. А., Безуглов О. Є., Вачков І. Ю. Ефективність вогнезахисного просочувального засобу ДСА для деревини дубу. *Проблеми пожежної безпеки.* 2017. № 42. С. 170–175. URL: <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/6204>.

6. Вовк С. Я., Пазен О. Ю., Придатко В. В., Ференц Н. О. Вогнезахисна ефективність покриттів для дерев'яних конструкцій на основі силікату натрію. *Пожежна безпека.* 2022. № 41. С. 38–46. <https://doi.org/10.32447/20786662.41.2022.05>

7. Веселівський Р. Б., Смоляк Д. В. Способи вогнезахисту металевих будівельних конструкцій. *Пожежна безпека.* 2021. № 39. С. 63–76. <https://doi.org/10.32447/20786662.39.2021.08>.

8. Беліков А. С., Шаломов В. А., Корж Є. М., Рагімов С. Ю. Підвищення вогнестійкості

дерев'яних будівельних конструкцій за рахунок зниження горючості деревини. *Строительство, материаловедение, машиностроение.* 2017. № 98. С. 41–43.

9. Коваленко В. В., Добростан О. В., Тимошенко О. М., Борисова А. С. Удосконалення методу випробувань з визначення вогнезахисної здатності вогнезахисних засобів. *Цивільний захист та пожежна безпека.* 2022. № 2 (14). С. 44–51. [https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2\(14\).44-51](https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2(14).44-51)

10. Дослідження показників якості вогнезахисних матеріалів «Методи контролю вогнезахисту»: звіт про науково дослідну роботу / В. В. Коваленко, О. В. Добростан, С. В. Новак та інші. Київ : ІДУ НДЦЗ, 2023. 259 с.

11. Засоби вогнезахисні для деревини. Методи визначення вогнезахисних властивостей : 16363-98. [Чинний від 2000-09-01]. Київ : Міждержавний стандарт, 2000. 7 с.

12. Про затвердження Правил з вогнезахисту: наказ Міністерства внутрішніх справ України від 26 грудня 2018 р. № 1064. *Офіційний вісник України.* 2019. № 26. Ст. 2214.

13. Деревина вогнезахисна. Загальні вимоги. Методи випробувань. Транспортування та зберігання : 30219-95. [Чинний від 1998-01-01]. Київ: Міждержавний стандарт, 1996. 12 с.

14. Гаврилюк А. Ф., Гайдук М. О., Дуленко Д. І. Дослідження впливу взаємозаміни вогнезахисного засобу на зниження показників вогнезахисної ефективності дерев'яних будівельних конструкцій. *Пожежна безпека.* 2021. № 39. С. 12–20. <https://doi.org/10.32447/20786662.39.2021.02>.

15. Пожежовивбухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація : ДСТУ 8829:2019 [Чинний з 01.01.2020]. Київ : УкрНДНЦ, 2020. 75 с.

16. Шкоруп О. О., Новак С. В., Міщенко С. А. Провести дослідження та розробити вимоги до виконання і приймання робіт з вогнезахисного оброблення будівельних конструкцій та методи контролювання їх якості «Якість вогнезахисту»: звіт про науково дослідну роботу. Київ : УкрНДІПБ, 2010. 330 с.

References

1. Islam, M. N., Ando, K., Hattori, N., Yamauchi, H., & Kobayashi, Y. (2008). [Comparative study between full cell and passive impregnation method of wood preservation for laser incised Douglas fir lumber]. *Wood Sci Technol.* № 42. 343–350. [in English].

2. Haiduk, M. O., Havryliuk, A. F., & Yakovchuk, R. S. (2024). Problemni aspekty vyznachennia vohnezakhystu derevyny. [Problematic aspects of determining the fire resistance of wood]. *Komunalne gospodarstvo mist – Municipal utilities*, 182, 187–194. DOI: 10.33042/2522-1809-2024-1-182-187-194. [in Ukrainian].

3. Zhartovskiy, S V. (2018). Development of scientific foundations of fire protection of objects with fire load from cellulose-containing materials with aqueous fire-protective substances. Doctor's thesis. Kharkiv [in Ukrainian].

4. Chumachenko, S. M., Zhartovskiy S. V., & Titenko O. M. (2016). Metodyka rozroblennia matematychnoi modeli okholodzhualnogo efektu v protsesi nahrivannia zrazka derevyny, prosochenoho vodnoiu vohnebiozakhysnoiu rehovynoiu. [Methodology for developing a mathematical model of the cooling effect during the heating of a wood sample impregnated with an aqueous fire-retardant substance] *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy – Scientific Bulletin of the National Technical University of Ukraine*, 26.8, 337–347 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15421/40260851>

5. Chernukha, A. A., Bezuhlov, O. Ye., & Vachkov, I. Yu. (2017). Efektyvnist vohnezakhysnoho prosochualnogo zasobu DSA dlia derevyny dubu. [Effectiveness of the DSA fire retardant impregnation for oak wood]. *Problemy pozhezhnoi bezpeky – Fire safety issues*, 42, 170–175. URL: <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/6204>. [in Ukrainian].

6. Vovk, S. Ya, Pazen, O. Yu., Prydatko, V. V., & Ferents, N. O. (2022). Vohnezakhysna efektyvnist pokryt'iv dlia derevianykh konstruktsii na osnovi sylikatu natriiu [Fire-resistant effectiveness of coatings for wooden structures based on sodium silicate]. *Pozhezhna bezpeka – Fire safety*, 41, 38–46 <https://doi.org/10.32447/20786662.41.2022.05>. [in Ukrainian].

7. Veselivskiy, R. B., & Smoliak, D. V. (2021). Sposoby vohnezakhystu metalevykh budivelnykh konstruktsii [Methods of fire protection of metal building structures]. *Pozhezhna bezpeka – Fire safety*, 39, 63–76 <https://doi.org/10.32447/20786662.39.2021.08>. [in Ukrainian].

8. Bielikov, A. S., Shalomov, V. A., Korzh, Ye. M., & Rahimov, S. Yu. (2017). Pidvyshchennia voh-

nestiikosti derevianykh budivelnykh konstruktsii za rakhunok znyzhennia horiuchosti derevyny [Increasing the fire resistance of wooden building structures by reducing the flammability of wood]. *Stroytelstvo, materyalovedenye, mashynostroenye – Construction, materials science, mechanical engineering*, 98, 41–43 [in Ukrainian].

9. Kovalenko, V. V., Dobrostan, O. V., Tymoshenko, O. M, & Borysova, A. S. (2022). Udoskonalennia metodu vyprobuvan z vyznachennia vohnezakhysnoi zdatnosti vohnezakhysnykh zasobiv [Improvement of the method of testing to determine the fire-resistant properties of fire-resistant substances]. *Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka – Civil protection and fire safety*, (2)(14), 44–51. [https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2\(14\).44-51](https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2(14).44-51). [in Ukrainian].

10. Kovalenko, V. V, Dobrostan, O. V., Novak, S. V, Samchenko, T. V., Dolishnii, Yu. V., & Haiduk, M. O. (2023). Doslidzhennia pokaznykiv yakosti vohnezakhysnykh materialiv «Metody kontroliu vohnezakhystu» [Research on the quality indicators of fire-retardant materials «Fire protection control methods»]. Kyiv: IDU NDTsZ [in Ukrainian].

11. Zasoby vohnezakhysni dlia derevyny. Metody vyznachennia vohnezakhysnykh vlastyvostei: (2000). 16363-98. [Fire retardants for wood. Methods for determining fire retardant properties]: Interstate standard 16363-98]. Kyiv, Derzhkomstat Ukrainy [in Ukrainian].

12. Pro zatverdzhennia Pravyl z vohnezakhystu: nakaz Ministerstva vnutrishnikh sprav Ukrainy: vid 26 hrudnia 2018 r. № 1064. [On approval of the Fire Protection Rules: Order of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine dated December 26, 2018 No. 1064]. (2018, December 26) *Ofitsiyni visnyk Ukrainy – Official Gazette of Ukraine*, № 26. st. 2214 [in Ukrainian].

13. Derevyna vohnezakhysna. Zahalni vymohy. Metody vyprobuvan. Transportuvannia ta zberihannia : (1998). 30219–95. [The wood is fireproof. General technical requirements. Test methods. Transportation and storage]. Kyiv. Derzhkomstat Ukrainy [in Ukrainian].

14. Havryliuk, A. F., Haiduk, M. O. & Dulenko, D. I. (2021). Doslidzhennia vplyvu vzaiemozaminy vohnezakhysnoho zasobu na znyzhennia pokaznykiv vohnezakhysnoi efektyvnosti derevianykh budivelnykh konstruktsii. [Study of the effect of replacing a fire retardant on the reduction of the fire retardant efficiency of wooden building structures]. *Pozhezhna bezpeka – Fire safety*, 39, 12–20 <https://doi.org/10.32447/20786662.39.2021.02>. [in Ukrainian].

15. Pozhezhovybukhonebezpechnist rehovyn i materialiv. Nomenklatura pokaznykiv i metody yikhnoho vyznachennia. Klyasifikatsiia: (2020). DSTU 8829:2019. [Fire and explosion hazard of substances and materials. Nomenclature of indicators and methods of their determination. Classification]. Kyiv. Derzhkomstat Ukrainy [in Ukrainian].

16. Shkorup, O. O., Novak, S. V, Mishchenko, S. A. (2010). Provesty doslidzhennia ta rozrobyty vymohy

do vykonannya i pryimannya robit z vohnezakhysnoho obrobliannya budivelnykh konstruktsii ta metody kontroliuvannya yikh yakosti «Yakist vohnezakhystu» [To conduct research and develop requirements for the exe-

cution and acceptance of works on fire protection treatment of building structures and methods of controlling their quality «Quality of fire protection»]. Kyiv: UkrN-DIPB [in Ukrainian].

© А. Ф. Гаврилюк, М. О. Гайдук, 2024.

Науково-методична стаття.

Надійшла до редакції 25.11.2024.

Прийнято до публікації 18.12.2024.

DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.45.2024.04>*Л. Ф. Дзюба, О. В. Лазаренко, О. Ю. Пазен, П. В. Пастухов**Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
м. Львів, Україна*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4261-6490> – Л. Ф. Дзюба<https://orcid.org/0000-0003-0500-0598> – О. В. Лазаренко<https://orcid.org/0000-0003-1655-3825> – О. Ю. Пазен<https://orcid.org/0000-0002-3140-1101> – П. В. Пастуховo.lazarenko@ldubgd.edu.ua

ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКІВ ЗАГОРЯННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

Статистичні показники загорання електромобілів і відповідні дослідження в цьому напрямі свідчать про те, що частота пожеж електромобілів по всьому світу значно менша порівняно зі статистичними даними загорань автомобілів, що працюють на двигунах внутрішнього згорання. У США на 55 випадків загорань електромобілів припадає 284 130 випадків горіння автомобілів із ДВЗ. Окрім того, дослідження показують, що ймовірність займання батареї електромобіля в разі дорожньо-транспортної пригоди значно менша, ніж ймовірність загорання звичайного автомобіля.

Метою роботи визначено оцінювання ризику виникнення загорань літій іонного елемента живлення електромобіля. Для досягнення поставленої мети забезпечено виконання таких завдань: ідентифіковано чинники ризику виникнення загорань літій-іонного елемента живлення електромобіля, проведено аналіз статистичних даних і випадків загорання електромобіля внаслідок відмови літій-іонного елемента живлення, побудовано матрицю ризиків виникнення загорань електромобіля.

Для досягнення мети роботи використано порівняльний аналіз статистичних показників із подальшою аналітичною обробкою отриманих результатів, їх узагальненням і виявленням відповідних закономірностей.

Відповідно до проведеного оцінювання ризику загорань електромобілів, визначено такі основні причини загорання електромобілів, а саме: людську недбалість/халатність на виробництві (10%), самозаймання з невстановлених причин (22%), порушення роботи акумуляторної батареї під час заряджання або після (28%), ДТП (30%), втоплення (5%), дія полум'я (5%). З огляду на аналіз і чинні підходи до порядку оцінювання ризику, сформовано матрицю оцінювання ризиків займання електромобілів.

Отже, отримана матриця ризиків загорання електромобілів наочно продемонструвала та підтвердили таке: ризик займання електромобілів та іншого подібного транспорту переважно можна зарахувати до трьох ступенів ймовірності (дуже низький, низький і високий); відсутність заповнення значної кількості комірок матриці засвідчує про гостру потребу детального аналізу кожного випадку загорання електромобілів із максимально чітким визначенням причини загорання.

Зазначені результати дослідження, відповідно, є передумовою для проведення подальших досліджень і вдосконалення отриманої матриці ризиків загорань електромобілів.

Ключові слова: електромобіль, літій-іонний елемент живлення, загорання, ризик, оцінювання безпеки.

*L. F. Dzyuba, O. V. Lazarenko, O. Yu. Pazen, P. V. Pastukhov**Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine*

ASSESSMENT OF THE FIRE RISKS OF ELECTRIC VEHICLES

Statistics on electric vehicle fires and relevant research in this direction indicate that the frequency of electric vehicle fires worldwide is much lower compared to the statistics of fires in cars running on internal combustion engines. In the USA, 284,130 internal combustion engine fires account for 55 cases of electric vehicle fires. In addition, studies show that the probability of an electric vehicle battery catching fire in a traffic accident is much lower than that of a conventional car catching fire.

The purpose of the work is to assess the risk of ignition of the lithium-ion battery of an electric vehicle. To achieve the set goal, the following tasks were carried out: risk factors for the occurrence of fires in the lithium-ion battery of an electric car were identified, statistical data and cases of electric cars catching fire due to the failure of the lithium-ion battery were analysed, and a matrix of risks of fires in an electric car was constructed.

To achieve the goal of the work, a comparative analysis of statistical indicators was used, followed by analytical processing of the obtained results and their generalization and identification of relevant patterns.

According to the carried out assessment of the risk of electric cars catching fire, the following main reasons for electric cars catching fire were determined, namely: human negligence/negligence in production (10%), spontaneous combustion for unknown reasons (22%), malfunction of the battery during charging or after (28%), road accident (30%), drowning (5%), fire action (5%). Taking into account the conducted analysis and existing approaches to the procedure for conducting risk assessment, a matrix for assessing the risks of ignition of electric vehicles was formed.

The resulting matrix of risks of electric cars catching fire demonstrated and confirmed the following: the risk of catching fire of electric cars and other similar vehicles in the overwhelming majority can be attributed to three degrees of probability (very low, low and high; the lack of filling in a significant number of cells of the matrix indicates the urgent need for a detailed analysis of each case of fire electric cars with the most clear definition of the cause of ignition.

The specified research results, respectively, are a prerequisite for further research and improvement of the resulting risk matrix of electric vehicles.

Key words: electric vehicle, lithium-ion battery, ignition, risk, hazard assessment.

Вступ. Транспортні засоби на альтернативних джерелах енергії, такі як електромобілі, електромотоцикли, велосипеди, сьогодні набувають усе більшої популярності в різних країнах світу за рахунок своєї екологічності. Відповідно, у суспільстві є тверде переконання, що саме такий вид транспорту відіграватиме вирішальну роль у майбутньому та сприятиме покращенню екологічної ситуації на планеті [1]. Однак випадки загорання такого екологічного транспорту, подекуди з масштабними наслідками, змушують людей і відповідні наглядові органи різних країн більш прискіпливо вивчити питання безпечної експлуатації транспортних засобів на альтернативних джерелах енергії [2].

Статистичні показники загорання електромобілів і відповідні дослідження в цьому напрямі свідчать про те, що частота пожеж електромобілів по всьому світу значно менша порівняно зі статистичними даними загорань автомобілів, що працюють на двигунах внутрішнього згорання (далі – ДВЗ). У США на 55 випадків загорянь електромобілів припадає 284 130 випадків горіння автомобілів із ДВЗ. Окрім того, дослідження показують [3], що ймовірність займання батареї електромобіля в разі дорожньо-транспортної пригоди значно менша, ніж ймовірність загоряння автомобіля з ДВЗ. Це частково пояснюється меншою горючістю літій-іонних акумуляторних батарей порівняно з бензином. Однак зазначені дослідження не виключають ймовірності зміни ситуації в майбутньому за рахунок насичення споживчого ринку електричними транспортними засобами з терміном експлуатації більшим, ніж 10–15 років.

Постановка проблеми. Загалом припаркований електромобіль можна розглядати як

акумуляторну систему зберігання енергії. Таке твердження відповідає американському стандарту NFPA 855/2020, за яким оцінюють ризики [4] відповідних систем та об'єктів. Проте вказаний стандарт і додаткові дослідження [5] указують на необхідність подальшого уточнення та деталізації відповідної концепції для оцінювання ризиків, ураховуючи кількість різноманітних чинників, що впливають на виникнення пожежі. У світлі цього аналіз причин відмов і потенційних джерел небезпеки для електромобілів є критично важливим інструментом, який дає змогу надалі запобігти порушенню сталого функціонування системи, а також може використовуватися для оцінювання й пониження рівня системного ризику на будь-якому етапі експлуатації транспортного засобу. Залежності між небезпечними подіями та їх корінними причинами включно з людським чинником (або діями людини), несправністю компонент, зміною навколишнього середовища й умовами експлуатації можуть бути використані для прогнозування та виявлення потенційних чинників ризику в системі й оцінюванні їх можливого впливу на стан речей.

Пов'язаний із транспортними засобами загальний підхід оцінювання ризиків виникнення надзвичайної ситуації (пожежі) може відрізнитися залежно від обраного методу оцінювання й виду транспортного засобу. Для оцінювання ризиків і небезпек автомобіля з ДВЗ автори [6] розподіляють ймовірні причини порушення сталої роботи автомобіля, виходячи з класичного трикутника виникнення пожежі. У такому трикутнику безпосередня кількість чинників виникнення пожежі досить значна й різноманітна (рис. 1а).

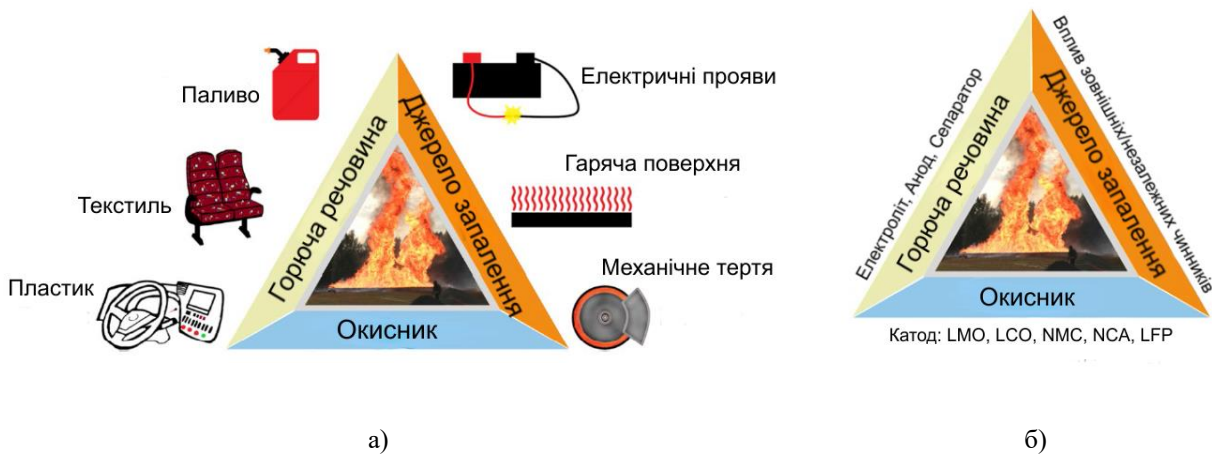


Рис. 1. Класичний трикутник виникнення загорання: а) автомобіль на двигуні внутрішнього згорання; б) електромобіль (транспортний засіб на акумуляторних батареях)

Під час оцінювання пожежної небезпеки й безпеки експлуатації електромобілів автори роботи [7] основну увагу зосередили безпосередньо на літій-іонній акумуляторній батареї або безпосередньо літій-іонному елементі живлення (далі – ЛПЕЖ), виходячи знову ж таки з класичного трикутника виникнення горіння (рис. 1б). Фактично робота [7] підтверджує та черговий раз наголошує, що під час оцінювання ризику та ймовірних небезпек виникнення загорання електромобілів та інших видів електротранспорту першочергову увагу варто звертати безпосередньо на ЛПЕЖ, його вид, тип тощо.

З огляду на актуальність аналізу й оцінювання ризику загорянь електромобілів у роботі [8] запропоновано здійснювати аналіз імовірних відмов і ризику загорянь електромобілів із використанням дерева відмов. Відповідно, в аналіз включено й надалі розділено такі чинники ризику: людська халатність, порушення сталої роботи електромобіля, помилки в організації загального процесу роботи й обслуговування електромобіля, зовнішні чинники. Загалом підхід авторів є зрозумілий і правильний, однак у роботі не приділено достатньої уваги оцінюванню ризику та небезпеки саме ЛПЕЖ, що, відповідно до більшості досліджень, є основною проблемою в цьому напрямі.

Автори [9] на підставі статистики загорянь електромобілів запропонували структурно-логічну схему оцінювання зниження ризику виникнення загорання електромобіля. Відповідно до тверджень дослідників [9], структурно-логічну схему можливо поділити на три основні блоки: визначення ризику, оцінювання ризику, зниження ризику. Тому оцінювання ризику загорянь чи порушення сталої роботи ЛПЕЖ у запропонованій структурно-логічній схемі посідає опосередковане місце.

Отже, подальші дослідження ризику займання транспортних засобів, які працюють на електричних батареях, повинні зосереджуватися на поглибленому вивченні ризиків відхилення від сталої роботи безпосередньо ЛПЕЖ.

Мети статті (постановка завдання). Відповідно до аналізу й останніх наукових досягнень, метою роботи є оцінювання ризику виникнення загорянь літій-іонного елемента живлення електромобіля.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- ідентифікувати чинники ризику виникнення загорянь літій-іонного елемента живлення електромобіля;
- провести аналіз статистичних даних і випадків загорання електромобіля внаслідок відмови ЛПЕЖ;
- побудувати матрицю ризиків виникнення загорянь електромобіля.

Виклад основного матеріалу. Відмови транспортних засобів ділять на функціональні й параметричні. За функціональних відмов транспортний засіб втрачає працездатний стан і його експлуатація стає неможливою. Параметричні відмови стосуються безпосередньо технічного стану транспортного засобу, коли деякі його параметри виходять за допустимі межі. Такі відмови усувають під час планового чи позапланового технічного обслуговування. До таких відмов можна зарахувати несправність гальмівної, охолоджуючої та інших систем транспортного засобу, порушення сталої роботи електродвигуна тощо. З огляду на особливості транспортних засобів на електричних батареях (електромобілів), відмова ЛПЕЖ спричинить функціональну відмову електромобіля. Відповідно до [7], оптимальну безпечну роботу ЛПЕЖ можна охарактеризувати поняттям «безпечне вікно», яке залежне від двох основних складників: температури й напруги ЛПЕЖ (рис. 2).

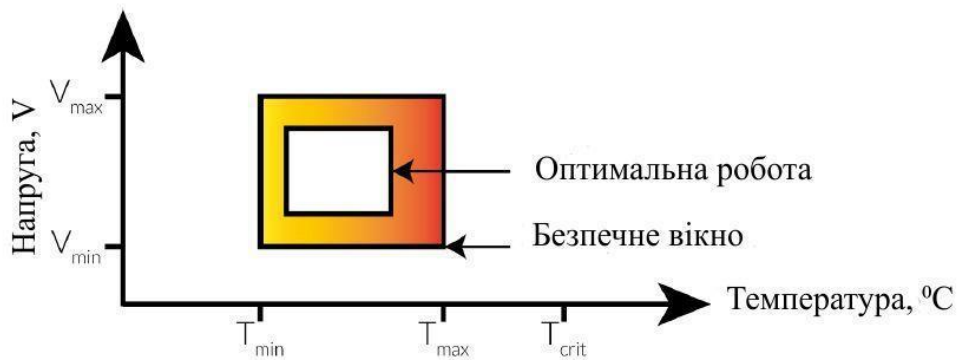


Рис. 2. Схематичне зображення обмежень безпечної експлуатації літій-іонного елемента живлення

Відповідно до рис. 2, відхилення робочих (номінальних) показників температури й напруги ЛПЕЖ призведе до порушення сталої функціонування елемента з подальшим можливим загорянням. Причинами порушення сталої роботи ЛПЕЖ може бути виробничий дефект елемента або поступове його спрацювання.

Виробничі дефекти зумовлюються поганим контролем якості збірки ЛПЕЖ, неправильним укладанням внутрішньої обмотки або потраплянням сторонніх елементів (речовин) у внутрішні шари ЛПЕЖ [8; 10].

Тривале використання ЛПЕЖ у будь-якому разі призводить до поступового спрацювання елемента, як наслідок, спостерігається втрата ємності й збільшення внутрішнього опору елемента [11]. Тривале використання ЛПЕЖ спричиняє втрату активних елементів (літію) та викликає відповідні фізичні й хімічні зміни в ньому. Це надалі є причиною виникнення внутрішнього короткого замикання, перегріву елемента [8].

Однак поряд із перерахованими причинами порушень сталої роботи ЛПЕЖ може виходити з ладу також унаслідок дії сторонніх чинників, до яких належить механічне пошкодження елемента, перегрів елемента від дії стороннього джерела енергії та дії надлишкового або неправильного струму. Зазначені чинники, з огляду на статистичні дані, є основними причинами виникнення загорань електромобілів [12].

Відповідно до [13], механічне пошкодження ЛПЕЖ є одним із найпоширеніших і найнебезпечніших, з огляду на пожежну безпеку, оскільки сприяє миттєвому загоранню елемента (особливо внаслідок проколювання корпусу елемента) і поширенню горіння. Механічне пошкодження елемента найчастіше спричиняється через попадання електромобіля в дорожньо-транспортну пригороду, наїзд на перешкоду (деформація акумуляторної батареї), непередбачувані випадки.

Наявність дії на ЛПЕЖ сторонніх температурних джерел можна умовно поділи на дію

високотемпературних і низькотемпературних. Високотемпературні джерела можуть виникати внаслідок появи неконтрольованого горіння (пожежі) поблизу ЛПЕЖ або умисного підпалу транспортного засобу. Низькотемпературні джерела характерні для відповідних регіонів, де транспортний засіб може перебувати або експлуатуватися в країнах чи регіонах із холодним кліматом (Фінляндія, Норвегія, Швеція). Дія зовнішнього високотемпературного джерела на ЛПЕЖ є прямою причиною виникнення горіння ЛПЕЖ [14]. Відповідно, наявність в електромобілі системи охолодження акумуляторної батареї є додатковим показником безпеки такого транспортного засобу.

Дію надмірного чи неправильного струму на ЛПЕЖ можна зарахувати до найбільшої небезпеки. Упродовж 2–5 секунд дія таких струмів спричиняє горіння елемента, інтенсивне виділення іскор, полум'я та продуктів горіння, а за певних умов вибух ЛПЕЖ [15]. Зазвичай такі випадки можуть виникати під час заряджання електромобілів і використання нетипового або пошкодженого обладнання. Додатково причинами дії надмірного струму на ЛПЕЖ може бути пошкодження або невідповідність відповідних елементів контролю транспортного засобу (BMS плати, програмного забезпечення) за параметрами, видом струму.

Крім того, серед ймовірних причин, що сприятимуть порушенню справної роботи ЛПЕЖ, варто окремо виділити умови експлуатації електромобілів, передусім кліматичні. Експлуатація електромобіля в умовах підвищеної вологості повітря, наявність агресивного середовища (окислене середовище, солоність повітря) спричиняють корозію та порушення роботи або відмову запобіжних елементів ЛПЕЖ. Це переважно стосується циліндричних ЛПЕЖ формату 18500, 21700 тощо, у будові яких наявний вентиляційний клапан для відключення полюсів елемента в разі підвищення його температури. Указані вище можливі причини відмов ЛПЕЖ безпосередньо сприяють

виникненню короткого замикання в елементі з подальшим горінням.

Оцінювання ризику загорань ЛПЕЖ електромобіля виконаємо на підставі рекомендацій ДСТУ ІЕС/ISO 31010:2013 «Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику» [16]. Ризиком вважаємо комбінацію ймовірності загорання ЛПЕЖ і шкоди й тяжкості цієї шкоди для електромобіля. Відповідно до [16], процес загального оцінювання ризиків складається з ідентифікації, аналізу й оцінювання ризиків. Ідентифікацію ризиків загорань електромобілів за результатами аналізу статистичних даних [12] за 2022–2024 роки подано в таблиці 1.

Додатково в таблиці 1 указано відсотковий показник відповідної причини займання електромобілів від загальної кількості задокументованих випадків. Аналіз випадків загорання електромобілів не дає однозначного розуміння впливу тих чи інших чинників на виникнення загорання ЛПЕЖ чи електромобіля загалом, оскільки виявлення точної причини загорання електромобіля чи акумуляторної батареї є комплексним і надзвичайно складним питанням. Відповідно, причини значної частини випадків загорання електромобілів (32%) точно не встановлені. Тому для безпосереднього ранжування ймовірності виникнення загорання ЛПЕЖ та електромобіля буде використано суб'єктивну оцінку з урахуванням логічних

і реальних умов впливу на життя та здоров'я людини.

Виходячи з роботи [6], для оцінювання впливу чинників ризику загорання ЛПЕЖ доцільно використовувати наведені в таблиці 2 критерії.

З метою зменшення й узагальнення деяких причин загорання електромобілів і відповідних імовірних чинників загорань позиції 2 та 4 таблиці 1 можна об'єднати в одне ціле із загальною сумою відсотків 28% (загорання електромобіля під час і після заряджання електромобіля/акумуляторної батареї). Тоді основною причиною загорання буде надлишковий або неправильний струм. З урахуванням характеру горіння ЛПЕЖ унаслідок дії надмірного струму й випадків таких загорань можна стверджувати, що внаслідок такого впливу транспортний засіб зазнає значних ушкоджень або й цілковитого знищення. Водночас імовірність загибелі людей є відносно мінімальна, адже заряджання транспортного засобу або акумуляторної батареї практично завжди здійснюється без присутності людей поблизу. З огляду на відсоток відповідних випадків і те, що більшість зарядних станцій розташовані на відкритих майданчиках або в місцях із дотриманням і врахуванням вимог пожежної безпеки, відповідну причину загорання можна зарахувати до «серйозного» чинника.

Фактично основну кількість випадків загорань електромобілів/ЛПЕЖ становлять ДТП

Таблиця 1

Зведена таблиця випадків загорань електромобілів за 2022–2024 роки

№ з/п	Причина загорань	Кількість випадків			Відсоток від загальної кількості, %
		2022	2023	2024	
1	Самозаймання з невстановлених причин	146	147	165	32
2	Під час заряджання або після (упродовж 60 хв)	71	98	90	18
3	ДТП	118	142	155	30
4	Порушення роботи акумуляторної батареї	42	49	51	10
5	Втоплення	25	28	25	5
6	Дія полум'я (підпал, сторонні джерела енергії, ремонт)	17	24	25	5
	РАЗОМ	419	488	511	100

Таблиця 2

Рівень впливу чинників ризику

Вплив чинників ризику	Наслідки впливу
Незначний	Ідентифікація відмови роботи літій-іонного елемента живлення за рахунок засобів діагностики без подальшого горіння
Легкий	Наслідок визначений перед початком виникнення загорання (під час зростання температури елемента). Незначні матеріальні затрати на відновлення
Помірний	Незначні матеріальні втрати на відновлення частини (елемента) транспортного засобу, без загрози життю.
Серйозний	Значні пошкодження транспортного засобу. Можливі травми людей.
Катастрофічний	Серйозні пошкодження транспортного засобу та прилеглих конструкцій із випадками людських утрат

(30%). Відповідно до оприлюднених даних Усесвітньої організації здоров'я [17], у ДТП щороку гине 1,19 млн людей. ДТП є основною причиною смерті людей віком від 5 до 29 років. Очевидним є те, що внаслідок ДТП кузов транспортного засобу, так само як й інші елементи конструкції, зазнає значних деформацій і пошкоджень різноманітного характеру. Унаслідок цього спостерігається механічне пошкодження ЛЛЕЖ через проколювання чи деформацію корпусу. Відповідно, ДТП або інші чинники, пов'язані із зовнішнім впливом на цілісність елементів конструкції транспортного засобу, необхідно зарахувати до подій із «катастрофічними» наслідками.

За причиною виникнення загорання електромобілів дія стороннього джерела тепла чи полум'я становить лише 5% від загальної кількості загорань. З огляду на той факт, що виникненню стороннього високотемпературного джерела може сприяти необережне поводження з вогнем сторонніх осіб, підпал, несправність різноманітного обладнання, тощо, імовірність виникнення такого випадку досить велика. За статистичними даними, лише в Україні щороку виникає близько 70 тисяч пожеж, під час яких гине більше ніж 1400 людей [18]. Отже, дію відкритого полум'я можна зарахувати до «помірного» впливу чинника ризику.

Згідно з таблицею 1, втоплення становить 5% від загальної кількості загорань електромобілів. На підставі аналізу можливої відмови ЛЛЕЖ, що може спричинити загорання, «втоплення» можна зарахувати до дії зовнішніх несприятливих погодних умов, таких як: дія сторонніх низькотемпературних джерел, підвищена вологість повітря, наявність агресивного середовища. Тобто умови експлуатації транспортного засобу/ЛЛЕЖ, регіон або країна використання можуть призвести до пришвидшеної корозії ЛЛЕЖ, виходу з ладу окремих елементів і блоків керування електроніки, як наслідок, загорання транспортного засобу. Зважаючи на незначний відсоток імовірності виникнення таких випадків, відповідну причину відмови можна зарахувати до чинника ризику з «легкими» наслідками впливу.

Окремо необхідно проаналізувати практично третину загорань електромобілів (32%), коли не встановлено однозначної причини. Із цілком очевидних і зрозумілих причин не завжди вдається однозначно й точно визначити причину пожежі чи загорання, зокрема внаслідок повного вигорання об'єкта. Відповідно до виконаного аналізу ймовірних чинників загорань, сюди можна зарахувати такі: невстановлений виробничий дефект; поганий контроль якості збірки; неправильне укладання внутрішньої обмотки; утрата ємності

й збільшення внутрішнього опору елемента, утрата активних елементів (літію); фізичні та хімічні зміни в ЛЛЕЖ і його перегрів; внутрішнє коротке замикання.

Практично всі перелічені чинники зумовлені людською недбалістю або халатністю на виробництві. Водночас такі чинники можуть бути причиною загорання лише за умови подальшої халатності й недбалості всіх другорядних і безпосередніх користувачів транспортного засобу (виробника, власника, сервісного центру). Безпосередня несправність ЛЛЕЖ на ранніх стадіях експлуатації обов'язково виявиться у вигляді системної помилки під проходження планового технічного огляду або безпосередньої експлуатації електромобіля. Водночас інші статистичні дані [19] свідчать, що загорання автомобіля досить часто не супроводжується безпосереднім горінням акумуляторної батареї, а в деяких випадках узагалі надзвичайну подію з електромобілем не можна класифікувати як загорання чи пожежу. Саме тому відповідну причину відмови можна зарахувати до «незначного» чинника ризику із загальним відсотком імовірності виникнення близько 10%.

Фізичні й хімічні зміни в ЛЛЕЖ, його перегрів, внутрішнє коротке замикання загалом – це чинники, які можна зарахувати до наслідків людської недбалості й халатності на виробництві. Однак це також може бути наслідком непередбачених обставин або сукупності ймовірних некласифікованих випадків. Відповідно, зазначенні чинники пропонується зарахувати до «самозаймання з невстановлених причин», проте з «помірним» впливом.

З огляду на сформульовані й обґрунтовані критерії причин і відповідний вплив зазначених чинників, з урахуванням таблицю 1 сформовано таблицю 3.

Для подальшого оцінювання ризиків загорання електромобіля внаслідок горіння ЛЛЕЖ прийнято ранжування ймовірності виникнення події (рис. 3), що ґрунтується на відсотковому значенні ймовірності виникнення загорання.

Усі ідентифіковані чинники загорання й імовірності їх виникнення дають змогу сформулювати узагальнену матрицю оцінювання ризиків займання електромобіля. Для позначення рівнів ризиків у матриці розміром 5×5 (таблиця 4) для оцінювання ризиків виникнення загорання прийнято такі позначення: помаранчева зона H(High) – високий; жовта зона M (Moderate) – помірний; зелена зона L(Low) – низький; темно-зелена зона VL(Very Low) – дуже низький. Матриця є зручним інструментом для візуалізації якісного (двовимірної)

Зведена таблиця причин несправностей і впливу чинників для формування матриці оцінювання ризиків загорань ЛЕЖ та електромобілів

№ з/п	Причина несправності, що може призвести до загорянь	Вплив чинника	Рівень імовірності	Імовірні чинники загорянь
1	Людська недбалість/ халатність на виробництві (PN)	Незначний	10	<ul style="list-style-type: none"> Невстановлений виробничий дефект. Поганий контроль якості збірки. Неправильне укладання внутрішньої обмотки. Утрата ємності й збільшення внутрішнього опору елемента. Утрата активних елементів (літію)
2	Самозаймання електромобіля з невстановлених причин (SI)	Помірний	22	<ul style="list-style-type: none"> Фізичні й хімічні зміни в ЛЕЖ. Його перегрів. Внутрішнє коротке замикання.
3	Порушення роботи акумуляторної батареї під час заряджання або після (упродовж 60 хв) (AF)	Серйозний	28	<ul style="list-style-type: none"> Надлишковий або неправильний струм
4	ДТП, вплив зовнішніх чинників на цілісність елементів конструкції та обладнання транспортного засобу (CI)	Катастрофічні	30	<ul style="list-style-type: none"> Механічне пошкодження елемента через проколювання чи деформацію корпусу
5	Втоплення (SM)	Легкий	5	<ul style="list-style-type: none"> Дія сторонніх низькотемпературних джерел. Підвищена вологість повітря. Наявність агресивного середовища. Поступове спрацювання
6	Дія полум'я (підпал, сторонні джерела енергії, ремонт) (FI)	Помірний	5	<ul style="list-style-type: none"> Дія сторонніх високотемпературних джерел

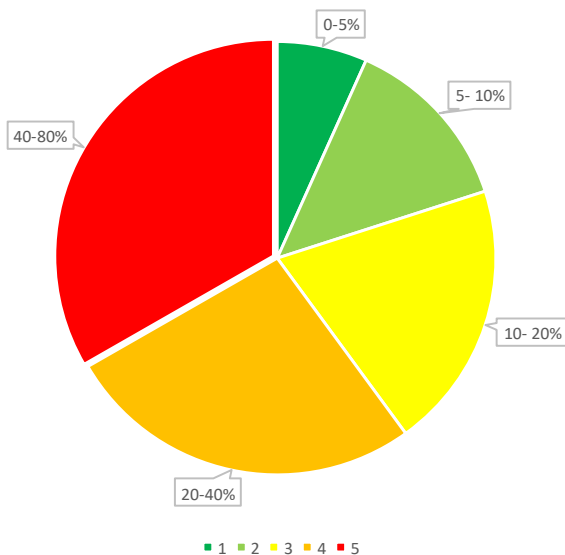


Рис. 3. Прийняте ранжування рівня ймовірностей загорянь

оцінювання ризиків загоряння електромобіля.

Сформована матриця (таблиця 4) дає чітке розуміння того, що горіння електромобіля фактично не супроводжується виникненням помірного й дуже високого ступеня ризику, таким чином, маємо підстави спростити матрицю до такого варіанта (таблиця 5).

Незважаючи на кінцевий варіант, у матриці є порожні комірки, які фактично визначають необхідність ведення деталізованої статистики подій і надзвичайних ситуацій, пов'язаних із загоранням електричних транспортних засобів, зокрема електромобілів.

Висновки. Відповідно до проведеного оцінювання ризику загорянь електромобілів, визначено такі основні причини загорання електромобілів, а саме: людську недбалість/халатність на виробництві (10%), самозаймання з невстановлених причин (22%), порушення роботи акумуляторної батареї під час заряджання або після (28%), ДТП (30%), втоплення (5%), дія полум'я (5%). З огляду

Спрощена матриця оцінювання ризиків займання електромобіля відповідно до проведеного попереднього оцінювання

Рівень впливу чинників ризику		Рівень імовірності ризикових подій		
		дуже низький	низький	високий
		0	1	2
Незначний	0	-	(PN)	-
Легкий	1	(SM)	-	-
Помірний	2	(FI)	-	(SI)
Серйозний	3	-	-	(AF)
Катастрофічний	4	-	-	(CI)

Таблиця 4

Матриця оцінювання ризиків загорання електромобіля

Рівень впливу чинників ризику		Рівень імовірності ризикових подій				
		дуже низький	низький	помірний	високий	дуже високий
		0	1	2	3	4
Незначний	0	-	(PN)	-	-	-
Легкий	1	(SM)	-	-	-	-
Помірний	2	(FI)	-	-	(SI)	-
Серйозний	3	-	-	-	(AF)	-
Катастрофічний	4	-	-	-	(CI)	-

на аналіз і наявні підходи до порядку оцінювання ризику, сформовано матрицю оцінювання ризиків займання електромобілів. Отримана матриця ризиків загорання електромобілів наочно продемонструвала й підтвердила таке:

1. Ризик займання електромобілів та іншого подібного переважно можна зарахувати до трьох ступенів імовірності (дуже низький, низький і високий).

2. Відсутність заповнення значної кількості комірок матриці засвідчує гостру потребу детального аналізу кожного випадку загорання електромобілів з максимально чітким визначенням причини загорання.

Зазначені результати дослідження, відповідно, є передумовою для проведення подальших досліджень і вдосконалення отриманої матриці ризиків загорань електромобілів.

Список літератури

1. Wipa Loengbudn, Kaveh Khalilpour, Gnana Bharathy, Firouzeh Taghikhah, Alexey Voinov. Battery and hydrogen-based electric vehicle adoption: A survey of Australian consumers perspective. *Case Stud. Transp. Policy* 2022, 10, 2451–2463. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2022.11.007>.

2. EVC. State of Electric Vehicles 2021 – Electric Vehicle Council, Electric Vehicle Council – Increasing the Uptake of EVs in Australia. 2021. URL: <https://electricvehiclecouncil.com.au/wp-content/uploads/2021/08/EVC-State-of-EVs-2021.pdf>.

3. Brandsikkerhed i garageanlaeg, oplag af lithium-ion batterier og batterier til solcelleanlaeg i bygninger / N. Kjeld et al. Denmark, 2022. https://www.sbst.dk/Media/638307217974871855/Analyse%20af%20brandsikkerhed%20i%20garageanl%C3%A6g%20-%20Ved%20batteriopl%C3%A6g%20BESS%202022_01_14.pdf.

4. Technical Committee on Energy Storage Systems and National Fire Protection Association: NFPA 855: Standard for the Installation of Stationary Energy Storage Systems. 2020. <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/nfpa-855-standard-development/855>.

5. Blanco-Muruzábal M., Martín-Gómez C., Zuazua-Ros A. From Combustion Vehicle to Electric Vehicle Parking, Through a Review of Legislation and Publications. *Archit Res*. 2022. № 12 (1). P. 1–11. <https://doi.org/10.5923/j.arch.20221201.01>.

6. Fire risk management procedure for vehicles and mobile machines rise RISE Research Institutes of Sweden. 2019. P. 43. URL: <https://ri.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1368722&dsid=-7754>.

7. Roeland Bisschop Ola Willstrand Francine Amon Max Rosengren Fire Safety of Lithium-Ion Batteries in Road Vehicles. RISE Research Institutes of Sweden. 2019. P. 43. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18738.15049>.

8. Mohd Zahirasri Mohd Tohir, César Martín-Gómez Electric vehicle fire risk assessment framework using Fault Tree Analysis. *Open Research Europe*. 2023. <https://doi.org/10.12688/openreseurope.16538.1>.

9. Md Kamrul Hassan, Nazra Hameed, Md Delwar Hossain, Fire Incidents, Trends, and Risk Mitigation Framework of Electrical Vehicle Cars in Australia Fire. 2023. № 6 (8). P. 325. <https://doi.org/10.3390/fire6080325>.

10. Zhang Y., Tao L., Xie C. Defect Engineering on Electrode Materials for Rechargeable Batteries. *Adv Mater*. 2020. № 32 (7). <https://doi.org/10.1002/adma.201905923>.

11. Battery degradation and behaviour for electric vehicles: Review and numerical analyses of several models / S. Pelletier, O. Jabali, G. Laporte et al. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2017. № 103. P. 158 G.187. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.01.020>.

12. EV FireSafe. Global Electric Vehicle Battery Fires, Ev FIRESAFE. 2022. URL: <https://www.EVFireSafe.com>

13. Lazarenko O., Berezhanskyi T., Pospolitak V., Pazen O. Assessing the effect of mechanical deformation of the Panasonic NCR18650B lithium-ion power cell housing on its fire safety. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. № 2 (7 (122)). P. 69–78. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.276780>.

14. Гаврилюк А. Ф., Яковчук Р. С. Експериментальні дослідження модулів силової батареї Tesla Model S на предмет пожежної небезпеки. *Пожежна безпека*. 2024. № 44. С. 5–12. <https://doi.org/10.32447/20786662.44.2024.01>.

15. Lazarenko O., Berezhanskyi T., Pospolitak V., Pazen O. Experimental evaluation of the influence of excessive electric current on the fire hazard of lithium-ion power cell. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. № 4 (10 (118)). P. 67–75. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263001>

16. ДСТУ ІЕС/ISO 31010:2013 «Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику».

17. World health organization report Road traffic injuries 2023. URL: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries>.

18. Аналітична довідка про пожежі та їх наслідки в Україні за 2023 рік. URL: <https://idudcz.dsns.gov.ua/upload/2/0/1/8/2/6/2/analitichna-dovidka-pro-pojeji-122023.pdf>.

19. Incidents with alternative fuel vehicles Annual report 2021–20223. URL: <https://nipv.nl/wp-content/uploads/2023/05/20230424-NIPV-Factsheet-Annual-report-2022-Incidents-with-alternative-fuel-vehicles.pdf>.

References

1. Wipa Loengbudn, Kaveh Khalilpour, Gnana Bharathy, Firouzeh Taghikhah, Alexey Voinov (2022). Battery and hydrogen-based electric vehicle adoption: A survey of Australian consumers perspective. *Case Stud. Transp. Policy* 10, 2451–2463. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2022.11.007>. [in English].

2. EVC. State of Electric Vehicles (2021). Electric Vehicle Council, Electric Vehicle Council – Increasing the Uptake of EVs in Australia.2021. [\[vehiclecouncil.com.au/wp-content/uploads/2021/08/EVC-State-of-EVs-2021.pdf\]\(https://vehiclecouncil.com.au/wp-content/uploads/2021/08/EVC-State-of-EVs-2021.pdf\). \[in English\].](https://electric-</p></div><div data-bbox=)

3. Kjeld, N., et al. (2022). Brandsikkerhed i garageanlaeg, oplag af litium-ion batterier og batterier til solcelleanlaeg i bygninger. Denmark, https://www.sbst.dk/Media/638307217974871855/Analyse%20af%20brandsikkerhed%20i%20garageanl%C3%A6g%20-%20Ved%20batteriopl%C3%A6g%20og%20BESS%2002_2022_01_14.pdf. [in English].

4. Technical Committee on Energy Storage Systems and National Fire Protection Association: NFPA 855 : Standard for the Installation of Stationary Energy Storage Systems. 2020. <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/nfpa-855-standard-development/855>. [in English].

5. Blanco-Muruzábal, M., Martín-Gómez, C., & Zuazua-Ros, A. (2022). From Combustion Vehicle to Electric Vehicle Parking, Through a Review of Legislation and Publications. *Archit Res.*; 12(1): 1–11. <https://doi.org/10.5923/j.arch.20221201.01>. [in English].

6. Fire risk management procedure for vehicles and mobile machines rise (2019). RISE Research Institutes of Sweden, p. 43. <https://ri.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1368722&dsid=-7754>. [in English].

7. Roeland, Bisschop, Ola, Willstrand, Francine, Amon, & Max, Rosengren (2019). Fire Safety of Lithium-Ion Batteries in Road Vehicles. RISE Research Institutes of Sweden, p. 43. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18738.15049>. [in English].

8. Mohd, Zahirasri, Mohd, Tohir, & César, Martín-Gómez (2023). Electric vehicle fire risk assessment framework using Fault Tree Analysis. *Open Research Europe* <https://doi.org/10.12688/openresearch.16538.1>. [in English].

9. Md, Kamrul. Hassan, Nazra. Hameed, Md., & Delwar Hossain (2023). Fire Incidents, Trends, and Risk Mitigation Framework of Electrical Vehicle Cars in Australia Fire 6(8), 325; <https://doi.org/10.3390/fire6080325>. [in English].

10. Zhang, Y., Tao, L., & Xie, C. (2020). Defect Engineering on Electrode Materials for Rechargeable Batteries. *Adv Mater.*; 32(7). <https://doi.org/10.1002/adma.201905923>. [in English].

11. Pelletier, S., Jabali, O., & Laporte, G., et al. (2017). Battery degradation and behaviour for electric vehicles: Review and numerical analyses of several models. *Transportation Research Part B: Methodological*; 103: 158–187. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.01.020>. [in English].

12. EV FireSafe. Global Electric Vehicle Battery Fires, Ev FIRESAFE. (2022). Available online: <https://www.EVFireSafe.com>. [in English].

13. Lazarenko, O., Berezhanskyi, T., Pospolitak, V., & Pazen, O. (2023). Експериментальні дослідження модулів силової батареї Tesla Model S на предмет пожежної небезпеки. [Assessing the effect of mechanical deformation of the Panasonic NCR18650B lithium-ion power cell housing on its fire safety]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*,

2 (7 (122)), 69–78. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.276780>. [in English].

14. Gavryliuk, A., & Yakovchuk, R. (2024). Experimental research of tesla model s power battery cells for open flame fire hazard. *Fire Safety*, 44, 5–12. <https://doi.org/10.32447/20786662.44.2024.01>. [in Ukrainian].

15. Lazarenko, O., Berezhanskyi, T., Pospolitak, V., & Pazen, O. (2022). Experimental evaluation of the influence of excessive electric current on the fire hazard of lithium-ion power cell. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (10 (118)), 67–75. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263001> [in English].

16. DSTU IEC/ISO 31010:2013 «Keruvannia ryzykom. Metody zahalnoho otsiniuvannia ryzyku» (2023). [DSTU IEC/ISO 31010:2013 «Risk manage-

ment. Methods of general risk assessment» World health organization report Road traffic injuries]. Access mode: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries>. [in Ukrainian].

17. World health organization report Road traffic injuries 2023. URL: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries>. [in English].

18. Analitychna dovidka pro pozhezhi tayikhaslidky v Ukraini za 2023 rik. [Analytical report on fires and their consequences in Ukraine for 2023]. Access mode: <https://idundcz.dsns.gov.ua/upload/2/0/1/8/2/6/2/analitichna-dovidka-pro-pojeji-122023.pdf> [in Ukrainian].

19. Incidents with alternative fuel vehicles Annual report 2021-20223 Access mode: <https://nipv.nl/wp-content/uploads/2023/05/20230424-NIPV-Fact-sheet-Annual-report-2022-Incidents-with-alternative-fuel-vehicles.pdf>. [in English].

© Л. Ф. Дзюба, О. В. Лазаренко, О. Ю. Пазен, П. В. Пастухов, 2024.

Науково-методична стаття.

Надійшла до редакції 15.10.2024.

Прийнято до публікації 18.12.2024.

DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.45.2024.05>*А. М. Домінік¹, Ю. М. Нагірняк¹, Д. В. Фреюк²**¹Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
м. Львів, Україна**²Львівський національний університет ветеринарної медицини
та біотехнологій імені С. З. Гжицького,
м. Львів, Україна*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0139-2002> – А. М. Домінік<https://orcid.org/0000-0001-9966-5560> – Ю. М. Нагірняк<https://orcid.org/0000-0001-7076-3431> – Д. В. Фреюк✉ dominik.andrij@gmail.com

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ НЕГАТИВНОГО ВПЛИВУ ТЕПЛОВОГО ПОТОКУ ВІД ОСЕРЕДКУ ПОЖЕЖІ НА НАВКОЛИШНІ ОБ'ЄКТИ

Розвиток технічного процесу створює нові фактори небезпеки пожежі. Поряд із цим велика увага рятувальників зосереджена на процесах розвитку й поширення горіння. Але не менш важливої уваги потребує й питання теплового ефекту пожежі. Явище теплового опромінення навколишнього середовища сприяє прискоренню процесу розповсюдження горіння. Виникає фактор небезпеки для навколишніх людей, адже при дії такого випромінювання з певним значенням на незахищені частини тіла людини може виникати ураження шкіри, опіків тощо.

Метою роботи є дослідження процесу розповсюдження теплового впливу від факелу пожежі залежно від різних обставин і чинників. Методом аналізу відомі наукові дослідження негативного впливу та способів захисту від теплових потоків.

Для проведення дослідження використовували теоретичні аспекти, що включали аналіз відомих публікацій і результатів експериментів.

З'ясовано, що питання негативного впливу теплової дії розглянуто й вивчено в багатьох роботах різних авторів. У статті проаналізовано та представлено дослідження науковців щодо питання розповсюдження теплових потоків, шкоди, що завдає теплове навантаження, а також математичного моделювання теплових процесів. Поряд із цим вивчено захисні властивості водяної завіси, створеної розпиленним струменем пожежного ствола.

Незважаючи на значний обсяг дослідження процесу теплообміну, питання захисту чи зменшення теплового навантаження залишається відкритим і не дослідженим повною мірою. Так, значну увагу дослідники приділили саме процесу пошкодження будівель і конструкцій від негативного впливу тепла, менше уваги – вивченню теплового навантаження та зменшенню потужності теплового потоку. Проте залишається забутиим захист пожежно-рятувальної техніки, що використовується в безпосередній близькості до полум'я пожежі. Усе це спричиняє пошкодження транспортного засобу й можливе подальше займання.

У ході дослідження встановлено, що науковці виконали чимало роботи для дослідження залежності зміни й негативного впливу теплового випромінювання. Однак питання захисту пожежно-рятувальної техніки від впливу теплового випромінювання під час гасіння пожеж залишається поза увагою, що створює часом приховану та додаткову небезпеку для особового складу. Саме тому за допомогою аналізу досліджень встановлено необхідність дослідження й упровадження відповідних інноваційних технологій захисту.

Ключові слова: тепловий потік, пожежа, факельне горіння, пожежно-рятувальна машина, тепловий вплив пожежі, теплообмін, водяна завіса.

ANALYSIS OF RESEARCH ON THE NEGATIVE INFLUENCE OF HEAT FLOW FROM THE FIRE CENTER ON THE SURROUNDING OBJECTS

The development of the technical process creates new fire hazards. Along with this, much rescuers' attention is focused on the processes of development and spread of combustion. But the issue of the thermal effect of fire requires no less attention. The phenomenon of thermal irradiation of the environment promotes the acceleration of the process of combustion spread. This creates a hazard factor for people around, because when such radiation is exposed to unprotected parts of the human body with a certain value, skin lesions, burns, etc. can occur.

The purpose of the study is studying the process of heat propagation from a fire plume depending on various circumstances and factors. The method of analysis is based on well-known scientific studies of the negative impact and methods of protection against heat flows.

Theoretical aspects were used to conduct the research, including the analysis of known publications and experimental results.

It has been found that the issue of the negative impact of thermal effects has been considered and studied in many works by different authors. The present work analyzes and presents the research of scientists on the propagation of heat fluxes, the damage caused by thermal load, as well as mathematical modeling of thermal processes. Moreover, the protective properties of the water curtain created by the sprayed jet of a fire hose are studied.

Despite a significant amount of research on the heat transfer process, the issue of protecting or reducing the heat load remains open and has not been fully explored. Thus, researchers have paid much attention to the process of damage to buildings and structures from the negative effects of heat. Less attention has been paid to the study of heat load and reduction of heat flow power. However, the protection of fire and rescue equipment used directly in the vicinity of the fire remains forgotten. All this causes damage to the vehicle and possible further ignition.

The research has shown that scientists have done a lot of work to study the dependence of changes and negative effects of thermal radiation. However, the issue of protecting firefighting equipment during emergency response from this hazard remains unaddressed, which sometimes creates a hidden and additional danger to personnel. That is why, based on the analysis of research, the need for research and implementation of appropriate innovative protection technologies has been established.

Key words: heat flow, fire, flaring, fire-rescue vehicle, thermal effect of fire, heat exchange, water curtain.

Постановка проблеми. Щоденний розвиток технічного процесу дає змогу суспільству адаптуватися до нових технологій. Проте поряд із цим залучаються дедалі небезпечніші сполуки чи речовини, що створюють загрозу життю та здоров'ю. Одним із факторів небезпеки впродовж усього розвитку залишається процес неконтрольованого горіння. Пожежа, що розповсюджується у відкритому просторі, створює чималу загрозу оточенню.

Одним із найнебезпечніших факторів, що досі залишається не вивченим повною мірою, є тепловий ефект. Висока температура горіння матеріалів дає змогу поширюватися вогню без жодних перешкод, створюючи небезпеку й для рятувальників. Поряд із цим тепловому ефекту піддаються й пожежні машини, які опиняються неподалік осередку горіння.

Мета статті (постановка завдання) – провести аналіз і дослідити процес вивчення проблеми розповсюдження теплового впливу від факелу пожежі залежно від різних обставин і чинників,

визначити і проаналізувати відомі наукові дослідження негативного впливу та способів захисту від теплових потоків.

Основним методом проведення дослідження є аналіз і викладення результатів досліджень науковців, що стосуються поширення й небезпеки теплового випромінювання.

Виклад основного матеріалу. У відкритих ресурсах зазначається, що теплове випромінювання – це явище, яке виникає в результаті взаємодії обертального й коливального руху атомів і молекул, із яких складаються речовини. Практично кожне тіло має теплове випромінювання, у зв'язку з тим що його температура перевищує абсолютний нуль.

Теплове випромінювання в різних його проявах багато досліджували відомі науковці як України, так і за кордоном. Так, наприклад, можна відзначити, що вчені [1] вивчали основні характеристики ліній теплового потоку. На основі проведених експериментальних досліджень для

одновимірною, двовимірною і тривимірною теплообміну декількох джерел тепла запропоновано метод, що дає змогу оптимізувати контроль і керування тепловими потоками в системах, що об'єднують декілька джерел тепла.

Дослідження характеристик теплообміну тепловими потоками також висвітлено науковцями [2]. В основу наукових експериментів авторами покладено вивчення перехідних характеристик теплопередачі теплового потоку на початковій стадії теплообміну, що дає можливість створити модель для дослідження зміни теплового потоку всередині тіла за періодичних теплових граничних умов. За допомогою цієї моделі досліджено відмінності між перехідним і сталим теплообміном, проаналізовано причини впливу частоти періодичного теплового потоку, теплопровідності й питомої теплоємності на перехідні характеристики теплообміну.

Поряд із процесом теплообміну між тепловими потоками іноземні й українські вчені зосереджують увагу на вивченні небезпеки теплового потоку саме від пожежі. Так Т. В. Костенко, А. І. Березовський та О. В. Костирка вивчали небезпеку теплового навантаження на рятувальників під час ліквідації наслідків масштабних пожежі, що включає зовнішні й внутрішні шляхи нагрівання. На основі аналізу залежності теплового навантаження від відстані встановлено переважаючі теплові потоки від дії пожежі, обґрунтовано залежність для оперативної оцінки променевого теплового потоку при горінні нафтопродуктів у резервуарах і подано вираз для розрахунку безпечних зон ведення аварійних робіт поблизу нафтопродуктів, що палають у резервуарах [3].

Дослідженню питання процесу теплообміну й випромінювання від факелу пожежі присвячено працю [4], де розглянуто та викладено різновидності взаємного розміщення будівельних конструкцій і площини полум'я, проаналізовано кутові коефіцієнти випромінювання і ступінь чорноти тіла. Дослідженнями виявлено залежність величини температурного поля від часу й товщини опромінюваної поверхні.

Процеси теплообміну значно поширені в усіх сферах функціонування суспільства, проте досить важливим і небезпечним фактором теплообміну є під час пожежі. Так, у праці [5] створено математичні моделі та проведено обчислювальні експерименти для встановлення конкретних параметрів, що впливають на температурний режим пожежі у вертикальному тунелі. У ході досліджень визначено динаміку зміни температури при відомих геометричних параметрах і пожежному навантаженні.

У дослідженнях, що представлено в роботі [6], визначали залежність теплового потоку від факторів величини й віддалі. Установлено, що величина теплового потоку, який падає на зовнішню поверхню пожежного модуля, досліджуваного в роботі, залежить від температури полум'я та ступеня чорноти досліджуваних об'єктів. При збільшенні віддалі між ним, а також зменшенні висоти факела величина теплового потоку різко зменшується.

Поряд із залежністю величини теплового потоку від віддалі й величини науковці звертають увагу на залежності від геометричних параметрів полум'я пожежі. Так, учені [7] шляхом кількісної оцінки й вивчення геометрії полум'я та властивостей теплопередачі отримали залежності між вітровим потоком і тепловою передачею, визначили швидкості зміни параметрів полум'я залежно від сили вітру, на основі чого створили фізичну модель.

Дослідженням розвитку пожеж займалася немала кількість науковців. Так, у праці [8] автори вивчали взаємодію двох лінійних пожеж, що зливаються, залежно від зміни вітрового й теплового потоку. На основі досліджень автори встановили залежність збільшення теплового потоку від сили вітру, а також швидкості й імовірності злиття полум'я стосовно заданих параметрів. Поряд із цим зі збільшенням швидкості тепловиділення кут нахилу полум'я збільшується на етапі повного злиття двох фронтів пожежі.

Однією зі сфер дослідження теплового потоку є аналіз і вивчення процесу його розподілу. Так, у праці [9] іноземні дослідники вивчали процес теплового випромінювання за різних умов вільного потоку. У ході експериментів кількісно визначено конвективний і радіаційний складники теплового потоку полум'я, що дало змогу розробити методіку кількісної оцінки складників теплового потоку з урахуванням локальних масових швидкостей вигорання й локальних градієнтів температури.

Під час ліквідації пожежі як іноземні, так й українські рятувальні підрозділи зосереджують значну увагу на захист суміжних об'єктів від теплового впливу, що знаходяться поряд з осередком пожежі. Так, для дослідження процесу теплопередачі між суміжними об'єктами проведено чимало досліджень, серед яких й українськими науковцями. Наприклад, у праці [10] автор зосередив увагу на експериментальному вивченні теплового випромінювання від джерела у вигляді пожежі на сусідні елементи будівель і конструкцій. Результати досліджень дали змогу провести верифікацію математичних моделей

теплообміну між сусідніми об'єктами, що створюють основу методології визначення протипожежних відстаней.

Подальші дослідження теплопередачі між сусідніми об'єктами проведено в роботі [11]. Автори розрахували моделі експериментальних досліджень і запропонували методику, де продемонстровано зразок, що дає змогу імітувати вплив теплового випромінювання на фрагмент конструкції під час пожежі. Поряд із цим ця методика містить обґрунтовані точки розміщення дослідних зразків, що дає можливість визначити найбільш інтенсивні місця нагрівання й інтенсивності теплового випромінювання.

Унаслідок повномасштабного вторгнення російського агресора, здійснення обстрілів по об'єктах критичної інфраструктури відбулося збільшення кількості пожеж на складах зберігання нафтопродуктів. Пожежам на складах зберігання нафтопродуктів, а також процесу ліквідації пожеж на цих підприємствах присвячено немало досліджень. Зокрема, вивченню та моделюванню такого типу пожеж присвячені роботи науковців таких, як М. М. Семерак, С. В. Поздєєв, Р. С. Яковчук, В. В. Чернецький, М. Р. Михайлишин. Автори в одній із робіт представили математичне моделювання теплообміну в резервуарному парку нафтопродуктів і спрогнозували на основі цього шляхи можливого поширення пожежі [12].

Досить часто поширення пожежі ускладнює для рятувальників процес її ліквідації. Саме тому це питання широко досліджують науковці в різних галузях та умовах. Так, у роботі [13] представлені напрацювання щодо дослідження поведінки полум'я на похилій поверхні, впливу на температуру, теплового потоку й розподілу швидкостей під час поширення пожежі. За допомогою результатів дослідження встановлено залежність швидкості зростання температурних показників і теплового потоку від кута нахилу поверхні, на якій відбувається процес поширення полум'я пожежі.

Дослідження негативного впливу теплового випромінювання безпосередньо супроводжується процесом вивчення способів зменшення інтенсивності теплового випромінювання, що дає змогу забезпечити захист навколишніх об'єктів чи рятувальників. Один із методів зменшення потужності теплового потоку вивчено в роботі [14]. Основні дослідження автор спрямовує на захисні властивості води, використовуючи гідродинамічні характеристики ствола, що водночас подає суцільний струмінь води на гасіння й утворює захисну водяну

завісу. Як результат дослідження представлено математичне моделювання екрануючої здатності завіси, встановлено залежність коефіцієнта екранування теплового потоку захисною водяною завісою, а також енергії теплового потоку від товщини завіси й запропоновано для вивчення нові закономірності екранування теплового потоку.

Подальші дослідження захисних властивостей водяних струменів різних типів висвітлили в працях науковці О. А. Гаврилко та Б. О. Білінський. Так, наприклад, у роботі [15] автори проаналізували причини трансформації водяних струменів у повітрі та дослідили вплив водяних струменів віялового типу на тепловий захист рятувальника під час пожеж. Результат роботи дає змогу визначити теоретичну залежність з урахуванням одночасної дії сили поверхневого натягу й сили в'язкості на стійкість струменя.

Поряд із найпростішими способами захисту від теплового випромінювання продовжуються дослідження захисних властивостей пасивного захисту. Так, у роботах А. Я. Шаршанов вивчає основні особливості захисної дії поглинаючих і відбиваючих екранів і покриттів; покриттів із матеріалу, що спучується; неоднорідних покриттів. Автор запропонував рішення нестационарної теплопровідності при нагріванні тонкого шару, порівняв коефіцієнти пропускання теплового потоку, що дало йому змогу отримати комплекс математичних моделей для опису процесів захисту, виявлення особливостей цих процесів, а також розробки алгоритмів і програмного забезпечення для вирішення прикладних завдань захисту [16].

Щодня рятувальні підрозділи ДСНС України здійснюють не менше ніж 100 виїздів на ліквідацію пожежі, що виникають на різних об'єктах навколишнього середовища, спричинені як наслідками військових дій країною-агресором, так і суцільними діями. Поряд із проривом науково-технічного та промислового прогресу, важливу роль в успішному виконанні завдань за призначенням визначає правильне розміщення сил і засобів, що також дає змогу захистити їх від негативного впливу теплового ефекту. Так, українські науковці дослідили оптимізацію вибору безпечного місця розташування пожежних машин і спеціального обладнання. Для досягнення отриманих результатів у працях опрацьовано відомі методики прогнозування поширення пожежі й запропоновано власну методику для визначення необхідної кількості, а також правильного місця розташування сил і засобів у ході ліквідації масштабних пожеж в екосистемах [17].

Підсумовуючи проаналізовані наукові дослідження та напрацювання, можна стверджувати, що процес теплового випромінювання й теплообміну є одним із основних факторів небезпеки для суміжних об'єктів, включаючи спеціальні транспортні засоби підрозділів ДСНС, що залучаються до гасіння пожеж.

Світова спільнота постійно і стрімко рухається в напрямі пошуку альтернативних та екологічно чистих джерел енергії, у тому числі й для транспорту, що щодня лише посилюється та прискорюється. Ця тенденція відображена в поширенні впровадження використання електромобілів у міжнародних пожежних підрозділах. Проте використання електробатарей досить чутливе до теплового випромінювання, потребує використання в сприятливих температурних режимах. Так, у працях [18–19] автор досліджує основні фактори, що сприяють виникненню пожеж на автомобілях, особливо електричних. Отримані результати дають змогу встановити часові межі температури самозаймання ізоляційних матеріалів електромережі, а також визначити пожежне навантаження на навколишнє середовище методом математичного моделювання динаміки розвитку пожежі.

Висновки. Отже, явище теплового ефекту проаналізовано й розглянуто не одним науковцем, проте питання безпеки теплового випромінювання все ще залишається не дослідженим повною мірою. Більшість досліджень спрямовані на визначення величини теплової дії на будівельні конструкції, які відносно можна вважати стаціонарними (якщо не враховувати переміщення самого полум'я в процесі горіння).

Проте, незважаючи на численні дослідження, досі не вивчено захист пожежних машин від теплового потоку залежно від зміни відстані або взаємного розташування машини й джерела теплової дії. Разом із тим пожежна машина має можливість маневрувати, як наслідок, змінювати тривалість перебування в небезпечному середовищі.

Проаналізувавши конструкції пожежних машин, виявили, що не всі елементи конструкції однаково піддаються тепловому впливу, що дає змогу виокремити такі конструктивні елементи й удосконалити їх характеристики або передбачити їх захист. Удосконалення конструкції пожежних машин має вагомое значення для забезпечення безпечної експлуатації останніх, що виконують свої функції під час гасіння пожеж. Важливість збереження пожежних машин заслуговує на проведення відповідних досліджень і впровадження відповідних інноваційних технологій захисту.

Список літератури

1. Yide Yang, Xin Chen, Mali Gong, Jianshe Ma, Research on the division of heat dissipation spaces for multiple heat sources based on the adiabatic characteristic of heat flow lines *Applied Thermal Engineering*. 2024. Vol. 257. Part B. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124263>.
2. Qi Deng, Hua Chen, Changpeng Yang, Xin Zhao, Wen-long Cheng, Study on transient heat transfer characteristics of heat flow under low frequency periodic thermal boundary conditions. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2024. Vol. 159. Part A. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.108021>.
3. Костенко Т. В., Березовський А. І., Костирка О. В. Прогнозування теплового навантаження на рятувальників під час гасіння пожеж у резервуарах з нафтопродуктами. *Пожежна безпека* : збірник наук. праць. Львів : ЛДУ БЖД. 2017. № 30. С. 91–98.
4. Семерак М. М., Домінік А. М., А. В. Субота Теплові потоки, зумовлені випромінюванням факела пожежі. *Пожежна безпека* : збірник наук. праць. Львів : ЛДУ БЖД. 2011. № 19. С. 131–136.
5. Serhii Troshkin, Oleh Kulitsa, Serhii Pozdieiev, et al. Determination of heat transfer process in vertical cable tunnels of nuclear power plants under real fire conditions [J]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. № 5 (10). Р. 34–42.
6. Семерак М. М., Домінік А. М., Мигаленко К. І., Руденко Д. В. Математичне моделювання та дослідження величини теплового потоку факела пожежі. *Вісник ЛДУБЖД* : збірник наук. праць. Львів : ЛДУ БЖД, 2013. № 7. С. 225–230.
7. Bo Li, Yangjin Shi, Shaohua Mao, Xiaoyang Ni, Kaihua Lu. Experimental investigation of the characteristics of flame geometry and heat transfer from wind-driven pool fires. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2024. Vol. 53. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102695>.
8. Xinjie Huang, Hailong Ding, Xinyi Zhang, Xinyi Li, Miaomiao Wang, Pengyuan Zhang. Effects of wind speed, spacing distance and heat release rate on the combustion and flame merging characteristics of two extra-thin line fires. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2024. Vol. 60. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104676>.
9. Alankrit Srivastava, Saurav Kumar, Ajay V. Singh, Heat transfer in wind-driven fires stabilized under a mixed-convective turbulent flow environment. *Fire Safety Journal*. 2024. Vol. 142. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.104040>.
10. Ніжник В. В. Розвиток наукових основ оцінювання безпеки поширення пожежі на суміжні будівельні об'єкти. Київ, 2020. 409 с.
11. A method of experimental studies of heat transfer processes between adjacent facilities / V. Nizhnyk, S. Shchipets, O. Tarasenko, V. Kropyvnytskyi, B. Medvid. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7. № 4.3. Special Issue 3. Р. 288–292.

12. Семерак М. М., Поздєєв С. В., Яковчук Р. С., Чернецький В. В. Моделювання теплового впливу пожежі на резервуари із нафтопродуктами в резервуарних парках. *Пожежна безпека* : збірник наук. праць. Львів : ЛДУ БЖД, 2016. № 29. С. 125–135.

13. Ying Zhang, Wei Zhang, Yifan Lin, Yue Chen, Kaiyuan Li. Flame attachment effect on the distributions of flow, temperature and heat flux of inclined fire plume. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2024. Vol. 174. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121313>.

14. Лазаренко О. В. Екранування теплового потоку радіальною водяною завісою, генерованою переносним водяним пожежним стволом багатопільового призначення. Львів, 2012. 171 с.

15. Гаврилко О. А., Білінський Б. О. Вплив водяних струменів віялового типу на тепловий захист під час пожеж. *Вісник національного університету «Львівська політехніка». Серія «Теорія і практика будівництва»*. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2017. № 877. С. 33–37.

16. Шаршанов А. Я., Абрамов Ю. О. Захист речовин і матеріалів від теплового впливу пожежі за допомогою екранів і покриттів. Харків : НУЦЗУ, 2023. 280 с.

17. Renkas A. A., Popovych V. V., Dominik A. A. Method for determining the optimal location of fire-fighting equipment for localization of ground forest fires. *Series of Geology and Technical Sciences*. 2021. Vol. 2, P. 144–150. DOI: 10.32014/2021.2518-170X.46.

18. Gavryliuk A., Yakovchuk R., Ballo Y., Rudyk Y. Thermal Modeling of the Electric Vehicle Fire Hazard Effects on Parking Building. *SAE Int. J. Trans. Safety*. 2023. № 11 (3). P. 421–434. <https://doi.org/10.4271/09-11-03-0013>.

19. Гаврилюк А. Ф., Гудим В. І., Назаровець О. Б. Дослідження режимів нагрівання провідників бортових електромереж автотранспортних засобів струмами короткого замикання. *Науковий вісник НЛТУ* : збірник наук. праць. Львів : РВВ НЛТУ України, 2015. № 25.4. С. 133–138.

20. Семерак М. М., Михайлишин М. Р. Вплив швидкості вітру на процеси теплообміну між вертикальними сталевими резервуарами (на прикладі пожежі на нафтобазі «БРСМ Нафта»). *Пожежна безпека* : збірник наук. праць. Львів : ЛДУ БЖД, 2017. № 30. С. 137–147.

References

1. Yide Yang, Xin Chen, Mali Gong, & Jianshe, Ma. (2024). Research on the division of heat dissipation spaces for multiple heat sources based on the adiabatic characteristic of heat flow lines *Applied Thermal Engineering*. Vol. 257, Part B. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124263>. [in English].

2. Qi, Deng, Hua, Chen, Changpeng, Yang, Xin,Zhao, & Wen-long, Cheng (2024). Study on transient heat transfer characteristics of heat flow under low frequency periodic thermal boundary conditions. *International Communications in Heat and Mass*

Transfer. Vol. 159, Part A. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.108021>. [in English].

3. Kostenko, T. V. (2017). Prohnozuvannia teplovoho navantazhennia na riatuvalnykiv pid chas hasinnia pozhezh u rezervuarakh z naftoproduktamy [Forecast of thermal load on rescuers during the exhaustion of fire in tanks with petroleum products] *Pozhezhna bezpeka : zb. nauk. prats'.* L'viv : LDU BZhd. № 30. S. 91–98. [in Ukrainian]

4. Semerak, M. M., Dominik, A. M., Myhalenko, K. I. Rudenko, D. V. (2013). Teplovi potoky, zumovleni vyprominiuvanniam fakela pozhezhi [Mathematical modeling and research of quantities of jet fire heat flow]. *Visnyk LDU BZhd: zb. nauk. prats'.* L'viv : LDU BZhd. № 7. S. 225–230. [in Ukrainian]

5. Serhii, Troshkin, Oleh, Kulitsa, Serhii, Pozdieiev, et al. (2023). Determination of heat transfer process in vertical cable tunnels of nuclear power plants under real fire conditions [J]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (10): 34–42. [in English].

6. Semerak, M. M., Dominik, A. M., & Subota, A. B. (2011). Matematyчне modeliuвання ta doslidzhennia velychyny teplovoho potoku fakela pozhezhi [Thermal flows caused by fire fakel waves]. *Pozhezhna bezpeka : zb. nauk. prats'.* L'viv : LDU BZhd. № 19. S. 131–136. [in Ukrainian]

7. Bo, Li, Yangjin, Shi, Shaohua, Mao, Xiaoyang, Ni, & Kaihua, Lu (2024). Experimental investigation of the characteristics of flame geometry and heat transfer from wind-driven pool fires. *Thermal Science and Engineering Progress*. Vol. 53. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102695>. [in English].

8. Xinjie, Huang, Hailong, Ding, Xinyi, Zhang, Xinyi, Li, & Miaomiao Wang, Pengyuan Zhang (2024). Effects of wind speed, spacing distance and heat release rate on the combustion and flame merging characteristics of two extra-thin line fires Case Studies in Thermal Engineering. Vol. 60. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104676>. [in English].

9. Alankrit, Srivastava, Saurav, Kumar, Ajay, V. (2024). Singh, Heat transfer in wind-driven fires stabilized under a mixed-convective turbulent flow environment. *Fire Safety Journal*. Vol. 142. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.104040>. [in English].

10. Nizhnyk, V. V. (2020). Rozvytok naukovykh osnov otsiniuvannia nebezpeky poshyrennia pozhezhi na sumizhni budivelni obiekty [Rozvytok naukovykh osnov otsiniuvannia nebezpeky poshyrennia pozhezhi na sumizhni budivelni obiekty]. Kyiv. 409 s. [in Ukrainian]

11. Nizhnyk, V. A. (2018). Method of experimental studies of heat transfer processes between adjacent facilities / S. Shchipets, O. Tarasenko, V. Kropyvnytskyi, B. Medvid *International Journal of Engineering & Technology*; Vol. 7, № 4.3: Special Issue 3. 288–292. [in English].

12. Semerak, M. M. (2016). Modeliuвання teplovoho vplyvu pozhezhi na rezervuary iz naftoproduktamy v rezervuarnykh parkakh [Modeling of ther-

mal fire effect on tanks with oil products in the tank farms]. M. M. Semerak, S. V. Pozdeyev, R. S. Yakovchuk, V. V. Chernetskyi *Pozhezhna bezpeka : zb. nauk. prats. Lviv : LDU BZhD. № 29. S. 125–135.* [in Ukrainian]

13. Ying, Zhang, Wei, Zhang, Yifan, Lin, Yue, Chen, & Kaiyuan, Li (2024). Flame attachment effect on the distributions of flow, temperature and heat flux of inclined fire plume *International Journal of Heat and Mass Transfer. Vol. 174.* <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121313>. [in English].

14. Lazarenko, O. V. (2012). Ekranuvannia teplovoho potoku radialnoiu vodianoiu zavisoiu, henerovanoiu perenosnym vodianym pozhezhnym stolom bahatotsilovoho pryznachennia [Shielding of the heat flow by a radial water curtain generated by a multi-purpose portable water fire barrel]. Lviv. 171 s. [in Ukrainian]

15. Havrylko, O., & B. Bilinsky (2017). Vplyv vodi- anykh strumeniv viialovoho typu na teplovyi zakhyst pid chas pozhezh [Influence of water type water torques on fire fight protection]. *Visnyk natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnik». Serie: Teoriia i praktyka budivnytstva. Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniky, No 877. P. 33–37.* [in Ukrainian]

16. Sharshanov, A. Ia., & Abramov, Yu. O. (2023). Zakhyst rehovyn i materialiv vid teplovoho vplyvu pozhezhi za dopomohoiu ekraniv i pokryttiv [Protection of substances and materials from the thermal

effects of fire using screens and coatings]. Kharkiv: NUTsZU, 280 s. [in Ukrainian]

17. Renkas, A. A., Popovych, V. V., & Dominik, A. A. (2021). Method for determining the optimal location of firefighting equipment for localization of ground forest fires. *Series of Geology and Technical Sciences, vol. 2, pp. 144–150.* DOI: 10.32014/2021.2518-170X.46. [in English].

18. Gavryliuk, A., Yakovchuk, R., Ballo, Y., & Rudyk, Y. (2023). «Thermal Modeling of the Electric Vehicle Fire Hazard Effects on Parking Building», *SAE Int. J. Trans. Safety* 11(3):421–434, <https://doi.org/10.4271/09-11-03-0013>. [in English].

19. Havryliuk, A. F. (2015). Doslidzhennia rezhymiv nahrivannia providnykh bortovykh elektromerezh avtotransportnykh zasobiv strumamy korotkoho замыкання [Study of modes of heating of conductors of on-board electrical networks of motor vehicles by short-circuit currents]. *Naukovyi Visnyk NLTU: Zb. nauk. Prats. L.: RVV NLTU Ukrainy, № 25.4 S. 133–138.* [in Ukrainian]

20. Semerak, M. M. (2017). Vplyv shvydkosti vitru na protsesy teploobminu mizh vertykalnymi stalevymy rezervuaramy (na prykladi pozhezhi na naftobazi «BRSM Nafta») [Influence of the wind velocity on the processes of heat transfer between vertical steel tanks (in the context of fire on the tank farm «BRSM NAFTA»)] *Pozhezhna bezpeka : zb. nauk. prats'. Lviv : LDU BZhD, № 30. S. 137–147.* [in Ukrainian]

© А. М. Домінік, Ю. М. Нагірняк, Д. В. Фреюк, 2024.

Оглядова стаття.

Надійшла до редакції 09.12.2024.

Прийнято до публікації 18.12.2024.



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.45.2024.06>

А. П. Кушнір¹, Б. Л. Копчак², В. М. Оксентюк², С. Я. Вовк¹

¹Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
м. Львів, Україна

²Національний університет «Львівська політехніка»,
м. Львів, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6946-8395> – А. П. Кушнір

<https://orcid.org/0000-0002-2705-8240> – Б. Л. Копчак

<https://orcid.org/0009-0005-1491-6946> – В. М. Оксентюк

<https://orcid.org/0000-0001-5278-3754> – С. Я. Вовк

✉ Sergiy_vovk@ukr.net

СИНТЕЗ ДВОМАСОВОЇ СИСТЕМИ ПІДПОРЯДКОВАНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ПОВОРОТОМ РОБОЧОЇ ПЛАТФОРМИ ПОЖЕЖНОГО АВТОПІДІЙМАЧА НА ОСНОВІ ДРОБОВИХ РЕГУЛЯТОРІВ

Конструкція стріли підйимального механізму пожежного автопідіймача не є абсолютно жорсткою, у результаті чого виникають пружні коливання робочої платформи. Ці коливання негативно впливають на роботу системи автоматичного керування переміщенням робочої платформи, а отже, ускладнюють роботу рятувальників. Для безпечного й ефективного виконання рятувальних операцій і гасіння пожеж на висоті система автоматичного керування поворотом робочої платформи повинна демпфувати пружні коливання, забезпечувати високу швидкість, плавність розгону й гальмування двигуна, статичну й динамічну точність відтворення заданих траєкторій, відсутність перерегулювання в перехідних режимах тощо.

У статті пропонується синтезувати позиційну систему, підпорядковану регулюванню поворотом робочої платформи з урахуванням пружних властивостей стріли. Синтез системи здійснюється модернізованим методом узагальненого характеристичного полінома шляхом застосування певної бажаної форми дробового порядку, яка дасть змогу забезпечити простоту виразу, необхідні динамічні і статичні характеристики переміщення робочої платформи за умови дії на неї керуючих і збурюючих впливів. Це дасть змогу зробити працю рятувальників більш безпечною та ефективною.

Для дослідження використано комплексний метод, який включає теоретичну механіку й теорію автоматичного керування, а саме синтез систем автоматичного керування. Для дослідження ефективності запропонованої системи підпорядкованого регулювання застосовано цифрове моделювання в пакеті Simulink програмного середовища MATLAB.

Для здійснення синтезу системи підпорядкованого регулювання необхідно мати математичну модель об'єкта керування. Оскільки стріла пожежного автопідіймача не є абсолютно жорсткою, то її можна представити двомасовою системою, складеною на основі рівняння Лагранжа. У роботі представлено триконтурну двомасову систему підпорядкованого керування поворотом робочої платформи. На основі модернізованого методу синтезу узагальненого характеристичного полінома здійснено структурно-параметричний синтез цієї системи підпорядкованого керування. Для цього синтезовано регулятори кутової швидкості двигуна, робочої платформи й положення на основі запропонованої бажаної дробової форми. У пакеті Simulink програмного середовища MATLAB на цифровій моделі досліджено синтезовану триконтурну двомасову систему підпорядкованого керування поворотом робочої платформи.

Отже, розширено застосування модернізованого методу синтезу узагальненого характеристичного полінома для позиційної триконтурної двомасової системи підпорядкованого керування поворотом робочої платформи шляхом застосування заданої компактною бажаною форми дробового порядку, яка забезпечує широкий спектр заданих динамічних характеристик. Це дало змогу здійснити структурно-параметричний синтез цієї системи, у результаті чого синтезовано регулятори кутової швидкості двигуна, робочої платформи й положення для всієї триконтурної системи підпорядкованого регулювання на основі запропонованої бажаної дробової форми. Як наслідок, перехідний процес вихідної координати

положення із синтезованим регулятором положення забезпечив час наростання $t_{0,95} = 4,273$ с без перегулювання, а цілочисельна складна система автоматичного керування положення забезпечувала час наростання $t_{0,95} = 4,423$ с відповідно. Отже, з новим регулятором отримано вигравш у швидкодії приблизно 5%.

Ключові слова: пожежний автопідіймач, регулятори дробового порядку, синтез, двомасова систем підпорядкованого регулювання, механізм обертання платформи.

A. P. Kushnir¹, B. L. Kopchak², V. M. Oksentiuk², S. Ya. Vovk¹

¹Lviv State University of Life Safety,

Lviv, Ukraine

²Lviv Polytechnic National University,

Lviv, Ukraine

SYNTHESIS OF A TWO-MASS SYSTEM OF SUBORDINATE REGULATION OF THE FIRE LIFT WORKING PLATFORM BY ROTATION BASED ON FRACTIONAL CONTROLLERS

The design of the boom of the lifting mechanism of the fire lifts is not absolutely rigid. As a result, elastic vibrations of the working platform occur. These oscillations negatively affect the operation of the automatic control system for moving the working platform, thus complicating the work of rescuers. For the safe and effective performance of rescue operations and extinguishing fires at height, the system of automatic control of the rotation of the working platform must damp elastic oscillations, ensure high speed, smooth acceleration and braking of the engine, static and dynamic accuracy of reproduction of given trajectories, absence of overregulation in transitional modes, etc.

In this article, it is proposed to synthesize a positional system of subordinate regulation by rotation the working platform, taking into account the elastic properties of the boom. The synthesis of the system control is carried out by the modernized method of the generalized characteristic polynomial by applying a certain desired form of the fractional order. This will allow ensuring the simplicity of expression and the necessary dynamic and static characteristics of the movement of the working platform under the conditions of controlling and disturbing influences acting on it. This will make the work of rescuers safer and more efficient.

A comprehensive method was used to conduct the research, which includes: theoretical mechanics and the theory of automatic control, namely, the synthesis of automatic control systems. To study the effectiveness of the proposed system of subordinate regulation, digital simulation in the Simulink package of the MATLAB software environment was used.

To carry out the synthesis of the system of subordinate regulation, it is necessary to have a mathematical model of the control object. Since the boom of the fire lifts is not completely rigid, it can be represented by a two-mass system based on the Lagrange equation. The work presents a three-loop two-mass system of subordinate regulation of the rotation of the working platform. On the basis of the modernized method of synthesis of the generalized characteristic polynomial, a structural-parametric synthesis of this system of subordinate regulation was carried out. For this purpose, controllers of the angular speed of the motor, working platform and position were synthesized based on the proposed desired fractional form. In the Simulink package of the MATLAB software environment, a study of a synthesized three-loop two-mass system of subordinate regulation of the rotation of the working platform was carried out on a digital model.

The application of the modernized method of synthesis of the generalized characteristic polynomial for the positional three-contour two-mass system of subordinate regulation of the rotation of the working platform by applying the given compact desired form of the fractional order is extended. The desired form of the fractional order provides a wide range of specified dynamic characteristics. This made it possible to carry out a structural and parametric synthesis of this system. As a result, the controllers of the angular speed of the motor, the working platform and the position for the entire three-loop system of subordinate regulation were synthesized on the basis of the proposed desired fractional form. As a result, the transient process of the initial position coordinate with the synthesized position controller provided a rise time of $t_{0,95} = 4.273$ s without overregulation, and the integer complex automatic position control system provided a rise time of $t_{0,95} = 4.423$ s, respectively. Thus, with the new controller, a gain in speed of approximately 5% was obtained.

Key words: fire lifts; fractional order controller, synthesis, two-mass system of subordinate regulation, platform's rotational mechanism.

Постановка проблеми. Для гасіння пожеж і проведення рятувальних робіт на великих висотах застосовують спеціалізовану пожежну техніку, зокрема автодрабини (із люлькою або без), автопідіймачі з люлькою тощо. Основними механізмами для переміщення люльки (робочої

платформи) є поворотна платформа і стріла. У колінчастих автопідіймачах стріла піднімається й розкладається, а в телескопічних варіантах також висувається. Кожен із цих механізмів оснащений власною системою автоматичного керування (далі – САК). У сучасних автопідіймачах ці системи об'єднані в єдину загальну САК, що має вищий ієрархічний рівень. Від роботи всіх цих САК залежить якість перехідного процесу переміщення робочої платформи, а отже, безпека як рятувальників, так і постраждалих.

Конструкція стріли підйимального механізму не є абсолютно жорсткою, у результаті чого виникають пружні коливання робочої платформи як у вертикальній, так і в горизонтальній площинах [1; 2]. Ці коливання можуть бути спричинені дефектами у виробничих механізмах і їх з'єднанні, великими рухомими масами, неефективною роботою самої системи керування, а також зовнішніми факторами, такими як вітрові навантаження, і реактивним впливом вогнегасних речовин. Ці фактори негативно впливають на роботу системи, а отже, ускладнюють роботу рятувальників.

Для демпфування пружних коливань стріли використовують як механічні пристрої, так і САК переміщенням робочої платформи. САК дає змогу не лише переміщати і стабілізувати робочу платформу в заданих координатах за умови відпрацювання завдання, а й ефективно демпфувати коливання стріли. Система керування повинна бути налаштована так, щоб в ідеальному випадку забезпечити аперіодичний, а ще краще монотонний характер перехідного процесу координат швидкості й кута.

Намагання отримати якісні показники переміщення робочої платформи призводить до ускладнення завдань, що виконуються, зокрема, САК поворотом робочої платформи. Ця САК повинна забезпечувати високу швидкість, плавність розгону й гальмування двигуна, статичну й динамічну точності відтворення заданих траєкторій, відсутність перерегулювання в перехідних режимах, необхідний запас стійкості, низьку чутливість до збурень, високу надійність.

Таким чином, надійна робота САК у сучасних автопідіймачах є критично важливою для безпечного й ефективного виконання рятувальних операцій і гасіння пожеж на висоті.

Аналіз останніх досягнень та публікацій. Для синтезу САК необхідно мати математичну модель механізму переміщення робочої платформи. Оскільки стріла пожежного автопідіймача не є абсолютно жорсткою, то її можна представити двомасовою системою [3]. Кут повороту робочої платформи є вихідною координатою керування.

Показники якості перехідного процесу кута повороту робочої платформи залежать і від внутрішніх контурів керування швидкістю вихідного вала виконавчого двигуна та швидкістю повороту робочої платформи.

У роботі [1] для дослідження коливань системи стріл автопідіймача, спричинених системою зсуву відкидної стріли підйомної платформи в робочому стані, використовуючи теорію динаміки багатьох тіл і рівняння Лагранжа, виведено динамічні диференціальні рівняння системи стріл. Отримавши й розв'язавши диференціальне рівняння динаміки, виконується динамічний аналіз кожної стріли та динамічний зв'язок між тиском у циліндрі й потоком робочої рідини. Результати показують, що коливання стріли під час підйому робочої платформи зумовлені взаємодією між розтягом і пружними згинами стріл. Крім того, необхідно враховувати вплив пружної деформації кожної стріли. Ця робота містить теоретичні основи для досліджень різного роду системи керування для демпфування коливань стріли.

У праці [4] шляхом кінематичного моделювання віртуального прототипу робочого пристрою змодельовано та досліджено криву переміщення, швидкості й прискорення центру робочої платформи. Отримано криву зусилля та максимальне зусилля з'єднувального шарніра. Силкові дані забезпечують параметри кінцево-елементного аналізу робочого пристрою автопідіймача. Однак у роботі не розглядається система керування переміщенням робочої платформи.

У праці [5] розроблено й досліджено систему керування двоциліндрового гідравлічного приводу механізму підйому робочої платформи. Запропонована еквівалентна стратегія синхронного керування, основана на нечіткому ПД-регулюванні. Нечіткі правила використовувалися для реалізації налаштування параметрів ПД-регулятора в реальному часі.

У роботі [2] на основі другого рівняння Лагранжа виведено математичну модель колінчастого автопідіймача й досліджено коливання платформи. Для демпфування коливань платформи запропоновано за певним законом формувати три вхідні сигнали керування. Моделювання показало, що для запобігання коливанням платформи ці формувачі вхідних сигналів при точному їх налаштуванні дають змогу досягнути бажаних результатів (дозволених вимог), але час реакції зріз більше ніж у два рази.

У роботах [6; 7] для регулювання амортизації наконечника гідравлічної системи крана під дією динаміки навантаження пропонується комплексне керування нечітким ПД-регулятором, який

об'єднує нечітке керування з покращеним пропорційним керуванням із прямою передачею на основі нечіткого налаштування та сегментованого інтегрального керування. Нечітке керування відповідає за стабільне керування, тоді як пропорційне керування з прямим зв'язком покращує продуктивність відстеження, а сегментований інтегратор адаптує керування до дій насичення. Зворотний зв'язок за сигналами положення й тиску в гідравлічній системі крана подає вхід системи, щоб контролювати демпфування накопичника крана. У роботі [7] уже для демпфування гідравлічної системи стріли крана запропонована стратегія ПІ-регулювання, основана на наступному зважуванні нечіткої заданої точки. Розроблено два ПІ-регулятори з клапанним керуванням, які включають пропорційний регулятор прямого зв'язку на основі нечіткого зважування заданого значення й обмежений напівінтегратор. Результати моделювання показують, що запропонована система керування дає змогу зменшити перерегулювання, а також збільшити швидкодію. Ці роботи можуть бути використанні для демпфування коливальної робочої платформи пожежного автопідіймача.

На основі проведених у роботах [8; 9; 10] досліджень показано, що регулятори дробового порядку мають переваги перед класичними регуляторами цілого порядку. Зокрема, у випадку їх застосування для оптимізації двомасових електромеханічних систем із наявністю удару, люфтів, в'язкого тертя валопривода, нелінійним навантаженням тощо. У праці [11] синтезовано ПІД-регулятор дробового порядку для системи керування вогнем, а саме кута повороту ствола гармати. Для вирішення завдання нелінійної багатокритерійної оптимізації запропоновано новий алгоритм багатокритерійної диференціальної еволюції на основі оптимального рішення за Парето. Однак математична модель повороту ствола гармати представлена як одномасова, хоч і враховано зовнішнє в'язке тертя.

У роботі [12] для нелінійної двомасової системи синтезовано PI^2D^m регулятор дробового порядку й регулятор активного усунення завад. Однак PI^2D^m регулятор синтезувався, коли зворотній зв'язок формувався за швидкістю першої маси. Регулятор активного усунення завад отримував інформацію про координати регулювання зі спостерігача, що робить систему досить складною з точки зору реалізації.

У праці [13] автори для вітрової турбіни синтезують регулятор дробового порядку за допомогою багатопільового генетичного алгоритму. Математичну модель турбіни розглядають як двомасову

систему з інтеграторами цілого порядку. Автори доводять, що цей регулятор забезпечує найкращу загальну продуктивність порівняно з усіма іншими регуляторами. Поте в цій роботі система будується як одноконтурна система.

У праці [14] модернізовано метод синтезу узагальненого характеристичного полінома (далі – УХП) для багатоконтурних електромеханічних систем за умови каскадного ввімкнення регуляторів дробового порядку. Наведено алгоритм синтезу регуляторів дробового порядку відповідних контурів регулювання. Проведені дослідження показали можливість реалізації каскадно ввімкнених дробових регуляторів для електромеханічних систем, де поєднуються контури з передавальними функціями (ПФ) цілого і дробового порядку, а також систем із контурами тільки дробового порядку. Однак у роботі синтезовано одномасову двоконтурну систему підпорядкованого регулювання (далі – СПР), де об'єктом регулювання є електропривод «тиристорний перетворювач – двигун».

Мета статті (постановка завдання). У статті пропонується синтезувати позиційну двомасову СПР поворотом робочої платформи з урахуванням пружних властивостей стріли. Синтез пропонується здійснити модернізованим методом УХП шляхом застосування певної бажаної форми дробового порядку, яка дасть змогу забезпечити простоту виразу та необхідні динамічні й статичні характеристики переміщення робочої платформи за умови дії на неї керуючих і збурюючих впливів. Це дасть можливість зробити роботу рятувальників більш безпечною та ефективною.

Для досягнення поставленої мети заплановано вирішити такі наукові завдання:

– модернізованим методом синтезу УХП здійснити структурно-параметричний синтез триконтурної позиційної двомасової СПР поворотом робочої платформи шляхом застосування певної бажаної форми дробового порядку;

– дослідити синтезовану триконтурну двомасову СПР поворотом люльки на комп'ютерній моделі.

Виклад основного матеріалу. Для здійснення синтезу СПР необхідно мати математичну модель об'єкта керування. У роботі [3] розроблено позиційну триконтурну двомасову СПР механізмом повороту люльки з урахуванням пружних властивостей стріли з люлькою. Структурна схема такої триконтурної СПР двомасової ЕМС показана на рисунку 1.

На структурній схемі рисунку 1 прийнято такі позначення: $W_{pn}(s)$ – передавальна функція регулятора положення люльки; $W_{pui1}(s)$, $W_{pui2}(s)$, – передавальні функції регуляторів кутової швидкості

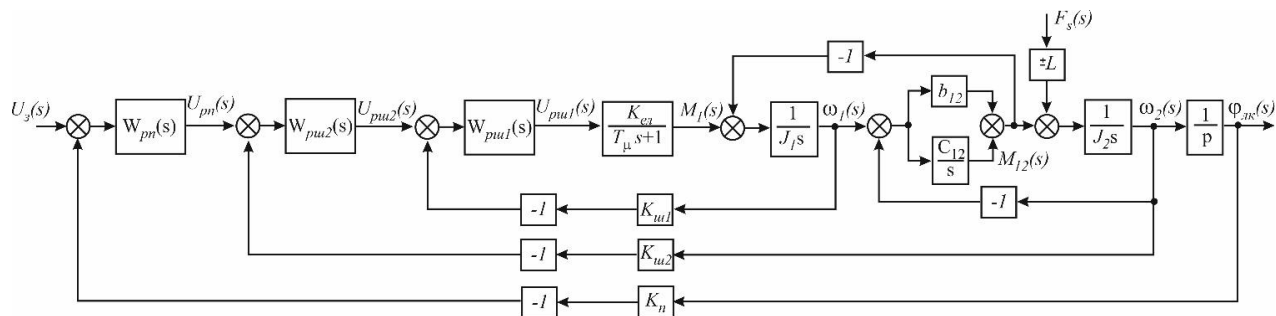


Рис. 1. Структурна схема триконтурної двомасової СПР поворотом робочої платформи

двигуна (першої маси) і робочої платформи (другої маси) відповідно; K_{u1} , K_{u2} , K_n – коефіцієнти передачі давачів швидкості двигуна, люльки й давача положення; J_1 , J_2 – сумарні моменти інерції першої та другої мас відповідно; M_1 – момент, що діє з боку двигуна; $F_s(s)$ – горизонтальний складник збурень, які зумовлені силою вітру й реактивним зусиллям від струменя води; C_{12} – коефіцієнт пружності деформації згину; b_{12} – коефіцієнт внутрішнього в'язкого тертя в пружній стрілі; $M_{12}(s)$ – момент пружної деформації стріли в горизонтальній площині; $\omega_2(s)$ – кутова швидкість робочої платформи, $\varphi_n(s)$ – кут повороту робочої платформи; s – оператор Лапласа; T_μ – мала некомпенсована стала часу (сума сталих часу перетворювача T_{np} і двигуна).

Гідравлічна система механізму підйому робочої платформи здебільшого приводиться в рух дизельним двигуном. У роботі [15] автори зазначають про негативний вплив значного шуму двигуна й вихлопних газів. Щоб позбутися цих негативних впливів, пропонується доповнити гідравлічну систему акумуляторною батареєю та електродвигуном. Це дало змогу зменшити витрати пального й шум. У роботі [16] для покращення статичних і динамічних показників показано переваги заміни механічної редукторної системи повороту платформи на електромеханічну безредукторною, яка приводиться в рух моментним вентильним двигуном. Відсутність редуктора спрощує механічну частину привода, дає змогу позбутися люфтів і підвищити жорсткість механізму. На рисунку 1 ПФ електричної частини привода стріли представлено аперіодичною ланкою першого порядку.

На основі модернізованого методом синтезу УХП [14] здійснимо структурно-параметричний синтез позиційної триконтурної двомасової СПР поворотом робочої платформи. Для цього синтезуємо регулятори кутової швидкості двигуна, робочої платформи й положення для всієї триконтурної двомасової СПР на основі запропонованої бажаної дробової форми.

У процесі синтезу багатоконтурних СПР із послідовним (каскадним) увімкненням регуляторів задіяний почерговий синтез регуляторів. Регулятор наступного контуру синтезується лише після завершення синтезу внутрішнього. Тому спочатку здійснюється синтез внутрішнього контуру регулювання швидкості двигуна. Синтез такої СПР поворотом робочої платформи будемо здійснювати без урахування коефіцієнта внутрішнього в'язкого тертя в пружній стрілі ($b_{12} = 0$).

Синтез регулятора кутової швидкості двигуна з використанням бажаної форми дробового порядку.

Розглянувши структурну схему двомасової СПР (рисунок 1), запишемо ПФ замкненого контуру швидкості двигуна $W_{\omega 1}(s)$:

$$W_{\omega 1}(s) = \frac{W_{pm1}(s) \frac{K_{ex}}{(T_\mu s + 1)} \frac{1}{J_1 s}}{1 + W_{pm1}(s) \frac{K_{ex}}{(T_\mu s + 1)} \frac{1}{J_1 s} K_{u1}} \quad (1)$$

Розділимо чисельник і знаменник отриманої ПФ на її чисельник, задамося як бажаною дробовою формою $W_{s1}(s)$.

Виберемо бажану форму дробового порядку. Це здійснимо відповідно до потрібного перехідного процесу. У роботі [17] уже запропонована така форма для параметричного синтезу. Тепер застосуємо її для структурно параметричного. Вираз її ПФ такий:

$$W_{s1}(s) = \frac{\omega_{o1} / K_1}{s^q + \omega_{o1}}, \quad (2)$$

де ω_{o1} – середньгеометричний корінь бажаної дробової форми, який визначає швидкодію синтезованої системи, q – дробовий порядок для характеристичного полінома, який визначає перерегулювання, K_1 – коефіцієнт підсилення зворотного зв'язку за синтезованою координатою регулювання.

Установимо як мету трансформацію отриманого виразу (1) у вираз як бажаної дробової форми

(2). Уведено коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю двигуна $K_1=K_{u1}$, а $\omega_{o1} = \omega_{oo1}$ (де ω_{oo1} – числове значення середньгеометричного кореня для контуру швидкості двигуна). Таким чином, отримано таке:

$$\frac{1}{\frac{J_1 s(T_\mu s + 1)}{W_{pu1}(s)K_{e1}} + K_{u1}} = \frac{\omega_{oo1} / K_{u1}}{s^q + \omega_{oo1}}. \quad (3)$$

З умови тотожності $W_{o1}(s)$ і $W_{s1}(s)$, розв'язавши рівняння (3), отримано ПФ регулятора першої кутової швидкості:

$$W_{pu1}(s) = \frac{J_1 s(T_\mu s + 1)\omega_{oo1}}{K_{e1}K_{u1}s^q}. \quad (4)$$

У результаті проведеного синтезу отримано структуру ПФ регулятора кутової швидкості двигуна дробового порядку (якщо $q \neq 1$) або цілого порядку (якщо $q=1$)

Підставивши числові параметри складників [3] та $q = 1,2$, отримали числовий вираз ПФ регулятора кутової швидкості двигуна для $\omega_{oo1} = 50 \text{ c}^{-1}$:

$$W_{pu1}(s) = 25s^{0.8} + \frac{250}{s^{0.2}} \quad (5)$$

Дослідження проведено в пакеті MATLAB Simulink із використанням додаткового пакету дробового числення NINTEGER.

Для ширшого показу можливостей запропонованого підходу додатково прорахуємо варіанти для ($q=1.0-1.1$ для $\omega_{oo1} = 50 \text{ c}^{-1}$). У результаті отримано числові вирази ПФ регулятора кутової швидкості двигуна:

$$W_{pu1}(s) = 25s + 250 \text{ для } q=1.0,$$

$$W_{pu1}(s) = 25s^{0.9} + \frac{250}{s^{0.1}} \text{ для } q=1.1.$$

Запропонований підхід дав змогу повною мірою здійснити структурно-параметричний синтез регулятора кутової швидкості двигуна двомасової СПР на основі використання запропонованої бажаної форми дробового порядку.

Синтез регулятора кутової швидкості робочої платформи з використанням бажаної форми дробового порядку.

На цьому етапі розглянуто синтез регулятора кутової швидкості робочої платформи двомасової СПР на основі здійсненого синтезу контуру швидкості двигуна, який оптимізований за використання бажаної форми дробового порядку.

Синтез контуру кутової швидкості робочої платформи двомасової СПР здійснимо за умови, що внутрішній контур кутової швидкості двигуна синтезовано згідно з (2), тобто отримана дробова ПФ.

Запишемо ПФ замкненого контуру кутової швидкості робочої платформи:

$$W_{o2}(s) = \frac{W_{pu2}(s)\frac{\omega_{oo1}}{K_{u1}}C_{12}}{(s^q + \omega_{oo1})(J_2 s^2 + C_{12}) + \frac{J_2}{J_1}C_{12}s^q + W_{pu2}(s)\frac{\omega_{oo1}}{K_{u1}}C_{12}K_{u2}}. \quad (6)$$

Розділимо чисельник і знаменник, отриманої ПФ (6), на її чисельник:

$$W_{o2}(s) = \frac{1}{(s^q + \omega_{oo1})(J_2 s^2 + C_{12}) + \frac{J_2}{J_1}C_{12}s^q} \cdot \frac{W_{pu2}(s)\frac{\omega_{oo1}}{K_{u1}}C_{12}}{K_{u2}}. \quad (7)$$

Як і для контуру першої кутової швидкості, задамося для контуру другої кутової швидкості як бажаною дробовою формою (8), у який попередньо введено коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю $K_1=K_{u2}$:

$$W_{so2}(s) = \frac{\omega_{oo2} / K_{u2}}{s^q + \omega_{oo2}}, \quad (8)$$

де ω_{oo2} – числове значення середньгеометричного кореня для контуру кутової швидкості робочої платформи.

З умови тотожності $W_{o2}(s)$ і $W_{so2}(s)$, розв'язавши рівняння, отримали ПФ регулятора швидкості двигуна (першої швидкості):

$$W_{pu2}(s) = \frac{\omega_{oo2}K_{u1}(s^q + \omega_{oo1})(J_2 s^2 + C_{12})}{\omega_{oo1}K_{u2}C_{12}s^q} + \frac{J_2\omega_{oo2}K_{u1}}{J_1\omega_{oo1}K_{u2}}. \quad (9)$$

Аналогічно до синтезу регулятора кутової швидкості двигуна, підставивши числові параметри складників із контуру швидкості двигуна для $\omega_{oo1} = 50 \text{ c}^{-1}$, отримали числовий вираз ПФ регулятора кутової швидкості робочої платформи для $\omega_{oo2} = 25 \text{ c}^{-1}$ та $q=1.0-1.2$:

$$W_{pu2}(s) = 45.22s^2 + 2261.1s + \frac{25}{s} + 52.18 \text{ для } q=1.0,$$

$$W_{pu2}(s) = 45.22s^{1.9} + 2261.1s^{0.9} + \frac{25}{s^{1.1}} + \frac{25.18}{s^{0.1}} \text{ для } q=1.1,$$

$$W_{pu2}(s) = 45.22s^{1.8} + 2261.1s^{0.8} + \frac{25}{s^{1.2}} + \frac{25.18}{s^{0.2}} \text{ для } q=1.2.$$

Синтез регулятора положення робочої платформи з використанням бажаної форми дробового порядку.

На цьому етапі розглянуто синтез регулятора положення робочої платформи двомасової СПР на основі того, що внутрішній контур першої кутової швидкості й контур другої кутової швидкості синтезовано за використання бажаної форми дробового порядку (2), отримано дробові ПФ регуляторів. Розглянувши структурну схему двомасової

СПР (рисунок 1), запишемо ПФ замкненого контуру положення з урахуванням ПФ оптимізованого контуру швидкості робочої платформи (8):

$$W_n(s) = \frac{W_{pn}(s) \frac{\omega_{o\omega 2} / K_{u2}}{s^q + \omega_{o\omega 2}} \frac{1}{s}}{1 + W_{pn}(s) \frac{\omega_{o\omega 2} / K_{u2}}{s^q + \omega_{o\omega 2}} \frac{1}{s} K_n}. \quad (10)$$

Розділимо чисельник і знаменник отриманої ПФ (10) на її чисельник:

$$W_n(s) = \frac{1}{\frac{K_{u2}(s^q + \omega_{o\omega 2})s}{W_{pn}(s)\omega_{o\omega 2}} + K_n}. \quad (11)$$

Як і для контуру швидкості, задамося як бажаною дробовою формою (2):

$$W_{sn}(s) = \frac{\omega_{on} / K_n}{s^q + \omega_{on}}, \quad (12)$$

де ω_n – числове значення середньогогеометричного кореня для контуру положення.

З умови тотожності $W_n(s)$ і $W_{sn}(s)$, розв’язавши рівняння, отримали ПФ регулятора положення робочої платформи:

$$W_{pn}(s) = \frac{\omega_n K_{u2} (s^q + \omega_{o\omega 2}) s}{\omega_{o\omega 2} K_n s^q}. \quad (13)$$

Аналогічно до синтезу попередніх регуляторів, підставивши числові параметри складників із контуру швидкості робочої платформи для $\omega_{o\omega 2} = 25 \text{ c}^{-1}$, отримали числовий вираз ПФ регулятора положення робочої платформи для $\omega_n = 0.7 \text{ c}^{-1}$ та $q=1.0-1.2$:

$$W_{pn}(s) = 0.044s + 1.0998 \text{ для } q=1.0,$$

$$W_{pn}(s) = 0.044s^{0.9} + \frac{1.0998}{s^{0.1}} \text{ для } q=1.1,$$

$$W_{pn}(s) = 0.044s^{0.8} + \frac{1.0998}{s^{0.2}} \text{ для } q=1.2.$$

У пакеті MATLAB Simulink на цифровій моделі проводилися дослідження синтезованої триконтурної двомасової СПР поворотом робочої платформи. Результати досліджень перехідних процесів положення робочої платформи для $q=1,0$ та $\omega_n = 0,7 \text{ c}^{-1}$ (13) і немодернізованої цілочисельної складної системи автоматичного керування положення показано на рисунку 2.

Результати досліджень підтвердили, що застосування запропонованої бажаної дробової форми дало змогу отримати задані перехідні процеси вихідної координати положення робочої платформи пожежного автопідіймача двомасової СПР із попередньо заданим перерегулюванням і попередньо заданим часом наростання. Загальний вигляд отриманого перехідного процесу координат у синтезованій запропонованим підходом триконтурної двомасової СПР поворотом робочої платформи повністю відповідає формі бажаної дробової ПФ.

Висновки. Отже, можемо резюмувати таке:

1. У статті розширено застосування модернізованого методу синтезу узагальненого характеристичного полінома для позиційної триконтурної двомасової СПР поворотом робочої платформи шляхом застосування заданої компактної бажаної форми дробового порядку, яка забезпечує

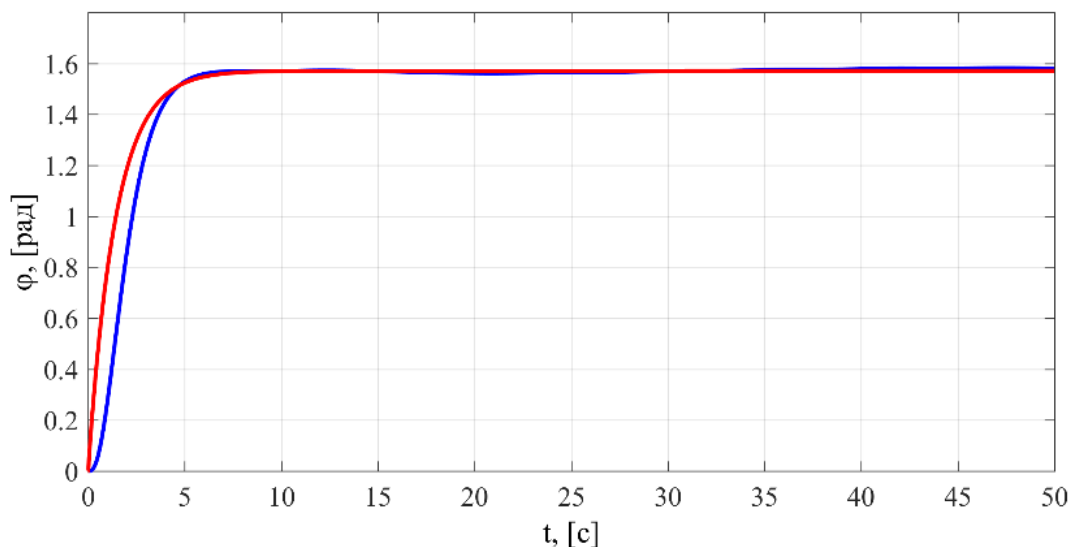


Рис. 2. Перехідні процеси вихідної координати положення із синтезованим регулятором положення (13), якщо $q=1,0$ – червона крива, і варіант із цілочисельними складними регуляторами – синя крива

широкий спектр заданих динамічних характеристик: крім швидкодії, можна отримати й бажане перерегулювання.

2. Такий підхід дав змогу здійснити структурно-параметричний синтез позиційної триконтурної двомасової СПР поворотом робочої платформи, у результаті чого синтезовано регулятори кутової швидкості двигуна, робочої платформи й положення для всієї триконтурної СПР на основі запропонованої бажаної дробової форми.

3. Результати досліджень продемонстрували повну працездатність запропонованого варіанта синтезу: отримано задане перерегулювання й час наростання. У результаті перехідний процес вихідної координати положення із синтезованим регулятором положення (13) забезпечив час наростання $t_{0,95}=4,273$ с без перерегулювання, а цілочисельна складна система автоматичного керування положення забезпечувала час наростання $t_{0,95}=4,423$ с відповідно. Отже, з новим регулятором отримано вираш у швидкодії приблизно 5%.

Список літератури

1. Du Jianwei, Gao Shunde, Teng Rumin. Dynamic Modeling and Analysis of Luffing System of Folding-Jib Aerial Platforms. *International Conference on Advances in Construction Machinery and Vehicle Engineering (ICACMVE)*. Changsha, 14–16 May 2019. P. 104–109. doi:10.1109/ICACMVE.2019.00029.
2. Fu Liang Wang, Zhi Gang Lv, Jing Qi Xiong, Ying Long Jing. Robust input shaping for anti-sway control of aerial working platform of folding arm mode. *International Conference on Electric Information and Control Engineering*. Wuhan, 15–17 April 2011. P. 3563–3566. doi:10.1109/ICEICE.2011.5778239.
3. Синтез системи автоматичного керування поворотом люльки пожежного автопідіймача з урахуванням пружних властивостей стріли / А. П. Кушнір, В.М. Оксентюк, І.П. Кравець, М. В. Войцех. *Пожежна безпека*. 2016. № 29. С. 93–99.
4. Jinqun Guo, Hongwen He, Chao Sun. Analysis of the Performance of Aerial Work Platform Working Device Based on Virtual Prototype and Finite Element Method. *Energy Procedia*. 2016. Vol. 104. P. 568–573. doi:10.1016/j.egypro.2016.12.096.
5. Ludi Zhang, Yushan Li. Synchronous Control of Double Hydraulic Cylinders of Scissors Aerial Work Platform Based on Fuzzy PID. *5th International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation (ICECTT)*. Nanchang, 15–17 May 2020. P. 349–354. doi:10.1109/ICECTT50890.2020.00084.
6. Yong Yang. Fuzzy-PI Damping Control for Hydraulic Crane Tip. *Fifth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*. Jinan, 18–20 October 2008. Vol. 5. P. 75–79. doi:10.1109/fskd14455.2008.
7. Yong Yang, An Luo, Karl-Erik Rydberg. PI control based on fuzzy set-point weighting tracking for hydraulic crane boom system. *Journal of Control Theory and Applications*. 2006. Vol. 4. Iss: 4. P. 327–330. doi:10.1007/s11768-006-5302-1.
8. Lozynskyy A., Chaban A., Perzynski T., Szafraniec A., Kasha L. Application of Fractional-Order Calculus to Improve the Mathematical Model of a Two-Mass System with a Long Shaft. *MDPI, Energies*. 2021. № 14 (7). P. 1854. <https://doi.org/10.3390/en14071854>.
9. Erenturk K. Fractional-Order $PI^{\alpha}D^{\mu}$ and Active Disturbance Rejection Control of Nonlinear Two-Mass Drive System. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2013. Vol. 60. Iss. 9. P. 3806–3813. doi:10.1109/TIE.2012.2207660.
10. Hüseyin Oktay Erkol. Optimal $PI^{\alpha}D^{\mu}$ controller design for two wheeled inverted pendulum. *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 75709–75717. doi:10.1109/ACCESS.2018.2883504.
11. Qiang Gao, Jilin Chen, Li Wang, Shiqing Xu, Yuanlong Hou. Multiobjective optimization design of a fractional order PID controller for a gun control system. *Scientific World Journal*. 2013. Vol. 2013 (1). P. 907256. <https://doi.org/10.1155/2013/907256>.
12. Koksal E. Fractional-order $PI^{\alpha}D^{\mu}$ and active disturbance rejection control of nonlinear two-mass drive system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2013. Vol. 60. Iss. 9. P. 3806–3813. doi: 10.1109/TIE.2012.2207660.
13. Ioana Paducel, Calin Ovidiu Safirescu, Eva-H. Dulf. Fractional Order Controller Design for Wind Turbines. *MDPI, Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Iss. 17. P. 8400. doi: 10.3390/app12178400.
14. Kopchak B., Marushchak Ya., Kushnir A. Devising a procedure for the synthesis of electromechanical systems with cascade-enabled fractional-order controllers and their study. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies: Information technology. Industry control systems*. 2019. Vol. 5. № 2 (101). P. 65–71. doi: 10.15587/1729-4061.2019.177320.
15. Chen Xinbo, Yin Minglu, Wu Lihua, Lang Jianzhong. Development of a motor-driven powertrain for hydraulic lift system of aerial work platform. *International Conference on Electric Information and Control Engineering*. Wuhan, 15–17 April 2011. P. 3205–3208. doi: 10.1109/ICEICE.2011.5777713.
16. Марущак Я. Ю., Кушнір А. П., Оксентюк В. М. Вентильний електропривод механізму повороту платформи пожежного автопідійомника. *Пожежна безпека*. 2014. № 24. С. 103–110. URL: <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/view/479>.
17. Kopchak B. Synthesis of automatic control systems by a particle swarm optimization method using Butterworth fractional standard forms. *16th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*. Lviv, 02–05 September 2015. P. 78–80. doi: 10.1109/CPEE.2015.7333342.

References

1. Du., Jianwei, Gao, Shunde, & Teng, Rumin (2019). Dynamic Modeling and Analysis of Luffing System of Folding-Jib Aerial Platforms. *International Conference on Advances in Construction Machinery and Vehicle Engineering (ICACMVE)*. pp. 104–109. Changsha, China. doi: 10.1109/ICACMVE.2019.00029 [in English].
2. Fu, Liang, Wang, Zhi, Gang, Lv, Jing, Qi, Xiong, & Ying, Long, Jing (2011). Robust input shaping for anti-sway control of aerial working platform of folding arm mode. *International Conference on Electric Information and Control Engineering*. pp. 3563–3566. Wuhan, China. doi: 10.1109/ICEICE.2011.5778239 [in English].
3. A. P. Kushnir, V. M. Oksentyuk, I. P. Kravets, & M. V. Voitsekh (2016). Syntez systemy avtomatychnoho keruvannia povorotom liulky pozhezhnoho avtopidimacha z urakhuvanniam pruzhnykh vlastyvoستي strily. [Automatic control system synthesis of fire lift's basket turning with taking into account elastic properties of an arrow]. *Fire Safety*. 29. 93–99 [in Ukrainian].
4. Jinqun, Guo, Hongwen, He, & Chao, Sun (2016). Analysis of the Performance of Aerial Work Platform Working Device Based on Virtual Prototype and Finite Element Method. *Energy Procedia*. Vol. 104. 568–573. doi: 10.1016/j.egypro.2016.12.096 [in English].
5. Ludi, Zhang, & Yushan, Li (2020). Synchronous Control of Double Hydraulic Cylinders of Scissors Aerial Work Platform Based on Fuzzy PID. *5th International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation (ICECTT)*. pp. 349–354. Nanchang, China. doi: 10.1109/ICECTT50890.2020.00084 [in English].
6. Yong, Yang (2008). Fuzzy-PI Damping Control for Hydraulic Crane Tip. *Fifth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*. pp. 75–79. Jinan, China. doi: 10.1109/fskd14455.2008 [in English].
7. Yong, Yang, An, Luo, & Karl-Erik, Rydberg (2006). PI control based on fuzzy set-point weighting tracking for hydraulic crane boom system. *Journal of Control Theory and Applications*. Vol. 4, Iss: 4. 327–330. doi: 10.1007/s11768-006-5302-1 [in English].
8. Lozynskyy, A., Chaban, A., Perzynski, T., Szafraniec, A., & Kasha L. (2021). Application of Fractional-Order Calculus to Improve the Mathematical Model of a Two-Mass System with a Long Shaft. *MDPI, Energies*. 14 (7). 1854. <https://doi.org/10.3390/en14071854> [in English].
9. Erenturk, K. (2013). Fractional-Order $PI^{\lambda}D^{\mu}$ and Active Disturbance Rejection Control of Nonlinear Two-Mass Drive System. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Vol. 60. Iss. 9. 3806–3813. doi: 10.1109/TIE.2012.2207660 [in English].
10. Hüseyin Oktay Erkol (2018). Optimal $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controller design for two wheeled inverted pendulum. *IEEE Access*. 6. 75709–75717. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2883504 [in English].
11. Qiang, Gao, Jilin, Chen, Li, Wang, Shiqing, Xu, & Yuanlong, Hou. (2013). Multiobjective optimization design of a fractional order PID controller for a gun control system. *Scientific World Journal*. 2013(1). 907256. <https://doi.org/10.1155/2013/907256> [in English].
12. E. Koksall (2013). Fractional-order $PI^{\lambda}D^{\mu}$ and active disturbance rejection control of nonlinear two-mass drive system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Vol. 60. Iss. 9. 3806–3813. doi: 10.1109/TIE.2012.2207660 [in English].
13. Ioana, Paducel (2022). Calin Ovidiu Safirescu, Eva-H. Dulf. “Fractional Order Controller Design for Wind Turbines”. *MDPI, Applied Sciences*. Vol. 12. Iss. 17. 8400. doi: 10.3390/app12178400 [in English].
14. Kopchak, B., Marushchak, Ya., & Kushnir, A. (2019). Devising a procedure for the synthesis of electromechanical systems with cascade-enabled fractional-order controllers and their study. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies: Information technology. Industry control systems*. Vol. 5. № 2 (101). 65–71. doi: 10.15587/1729-4061.2019.177320 [in English].
15. Chen, Xinbo, Yin, Minglu, Wu, Liuhua, & Lang, Jianzhong. (2011). Development of a motor-driven powertrain for hydraulic lift system of aerial work platform. *International Conference on Electric Information and Control Engineering*. pp. 3205–3208. Wuhan, China. doi: 10.1109/ICEICE.2011.5777713 [in English].
16. Marushchak, Ya., Kushnir, A. & Oksentyuk, V. (2014). Ventylnyi elektropryvod mekhanizmu povorotu platformy pozhezhnoho avtopidimnyka [Brushless electric drive of mechanism for turning platform fire lifts”. *Fire Safety*. 24. 103–110. <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/view/479> [in Ukrainian]
17. B. Kopchak. (2015). Synthesis of automatic control systems by a particle swarm optimization method using Butterworth fractional standard forms. *16th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*. pp. 78–80. Lviv. doi: 10.1109/CPEE.2015.7333342 [in English].

© А. П. Кушнір, Б. Л. Копчак, В. М. Оксентюк, С. Я. Вовк, 2024.

Науково-методична стаття.

Надійшла до редакції 25.11.2024.

Прийнято до публікації 18.12.2024.

DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.45.2024.07>***В. І. Лушч, Є. В. Кобко, Я. Б. Великий, Б. А. Романик****Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
м. Львів, Україна*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5931-3181> – В. І. Лушч<https://orcid.org/0000-0002-3121-0823> – Є. В. Кобко<https://orcid.org/0009-0002-3241-5211> – Я. Б. Великий<https://orcid.org/0000-0001-5586-8630> – Б. А. Романик✉ yaremavelikiy@gmail.com

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ У МАНСАРДНИХ ПРИМІЩЕННЯХ

Унаслідок сучасних тенденцій у будівництві ми можемо спостерігати зростання кількості житлових будинків без повноцінних поверхів, які обладнані мансардами. Мансарди можуть мати різні розміри й дизайн, починаючи від невеликих куточків під дахом до великих, просторих кімнат. Вони бувають оснащені вікнами або люками для освітлення і провітрювання, а також мати різні системи опалення й кондиціонування повітря залежно від місцевих умов і призначення приміщення. Пожежі в мансардних приміщеннях можуть бути особливо небезпечними через обмежений доступ і складні умови для гасіння. Такі пожежі часто важко помітити, вогонь може швидко поширюватися через дерев'яні конструкції даху й інші горючі матеріали, які можуть бути в мансарді. Таким чином, конструктивні особливості будівель із мансардними приміщеннями вимагають нових підходів і тактики дій для ефективного гасіння пожеж, які можуть виникати в них.

Мета роботи полягає у визначенні способів підвищення ефективності гасіння пожеж у мансардних приміщеннях житлових будівель.

Для досягнення поставленої мети здійснено аналіз вітчизняних і міжнародних джерел, що визначають порядок гасіння пожеж у мансардних приміщеннях, також розглянуто необхідне пожежно-технічне обладнання, методи гасіння пожеж у будівлях із мансардними приміщеннями.

У результаті проведеної роботи встановлено, що вітчизняні керівні документи й наукові роботи, які регламентують необхідність і порядок проведення гасіння пожеж у житловому секторі, неповною мірою (поверхово) розкривають суть проведення гасіння пожеж у будівлях із мансардними приміщеннями. На основі проведеного аналізу методів гасіння пожеж у таких приміщеннях, а також видів і шляхів газообміну під час пожежі в огороженні визначено один із альтернативних способів гасіння стволами-пробійниками, які забезпечують ефективну локалізацію та ліквідацію пожежі в мансардних приміщеннях.

У статті проаналізовано вітчизняні й закордонні джерела, що регламентують порядок організації гасіння пожеж у мансардних приміщеннях у житловому секторі, проведено аналіз необхідного пожежно-технічного обладнання та способів гасіння пожеж мансардних приміщень. Розроблено методику, яка б регламентувала порядок гасіння мансардних приміщень за найскладніших умов, запропоновано графічне позначення ствола-пробійника з насадками для гасіння й захисту.

Ключові слова: житловий сектор, мансардні приміщення, ланка газодимозахисної служби, газообмін, ствол пробійник.

V. I. Lushch, Ye. V. Kobko, Ya. B. Velykyi, B. A. Romanyk*Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine*

WAYS TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF EXTINGUISHING FIRES IN ATTIC ROOMS

Due to current trends in construction, we can observe an increase in the number of residential buildings without full floors, which are equipped with attics. Attics can have different sizes and designs, ranging from small corners under the roof to large, spacious rooms. They are equipped with windows or hatches for lighting

and ventilation, as well as have different heating and air conditioning systems, depending on local conditions and the purpose of the room. Fires in attic rooms can be especially dangerous due to limited access and difficult conditions for extinguishing. Such fires are often difficult to spot, and fire can spread rapidly through wooden roof structures and other combustible materials that may be in the attic. Thus, the design features of buildings with attic rooms require new approaches and tactics to effectively extinguish fires that may occur in them.

To achieve this goal, an analysis of domestic and international sources was carried out, determining the procedure for extinguishing fires in attic rooms. The necessary fire-technical and rescue equipment, and methods of extinguishing fires in buildings with attic rooms were also considered.

To achieve this goal, an analysis of domestic and international sources was carried out, determining the procedure for extinguishing fires in attic rooms. The necessary fire-technical and rescue equipment, and methods of extinguishing fires in buildings with attic rooms were also considered.

As a result of the work carried out, it is established that domestic governing documents and scientific works regulating the need and procedure for extinguishing fires in the residential sector do not fully (superficially) reveal the essence of extinguishing fires in buildings with attic rooms. On the basis of the carried out analysis of methods of extinguishing fires in such premises, as well as types and ways of gas exchange during a fire in the fence, one of the alternative methods of extinguishing trunks with punches was determined, which provide effective containment and elimination of fire in attic rooms.

The article analyzes domestic and foreign sources regulating the procedure for organizing fire extinguishing in attic rooms in the residential sector, analyzes the necessary fire-technical, rescue equipment and methods of extinguishing fires in attic rooms. A methodology has been developed that would regulate the procedure for extinguishing attic rooms under the most difficult conditions, a graphical designation of the punch barrel with nozzles for extinguishing and protection has been proposed.

Key words: residential sector, attic rooms, gas and smoke protection service link, gas exchange, punch barrel.

Постановка проблеми. Згідно зі статистичними даними, за останні 10 років в Україні відбувалося понад 200 пожеж щодня, значна кількість випадків гасіння яких пов'язана з небезпечним впливом на особовий склад пожежно-рятувальних підрозділів небезпечних продуктів горіння. Зокрема, дія високих температур і продуктів згорання (диму) значно ускладнюють проведення аварійно-рятувальних робіт і пожежогасіння. Статистичні дані про їх кількість виникнення й ліквідацію за 2019–2023 роки наведено на рисунку 1, щорічно в будівлях і спорудах виникає 40% пожеж від загальної їх щорічної кількості [1].

Ліквідація пожеж у приміщеннях горищного типу, які конструктивно наближені до мансардних приміщень, може бути складним завданням для особового складу пожежно-рятувальних підрозділів через низку умов, які ускладнюють обстановку під час проведення оперативних дій, а саме: наявність людей, яким загрожують небезпечні фактори пожежі; швидке поширення пожежі на кривлю й нижче розташовані поверхи, щільне задимлення коридорів і сходових кліток; приховане поширення вогню в порожнинах будівельних конструкцій, вентиляційних каналах і шахтах; у разі обмеженої кількості дверних

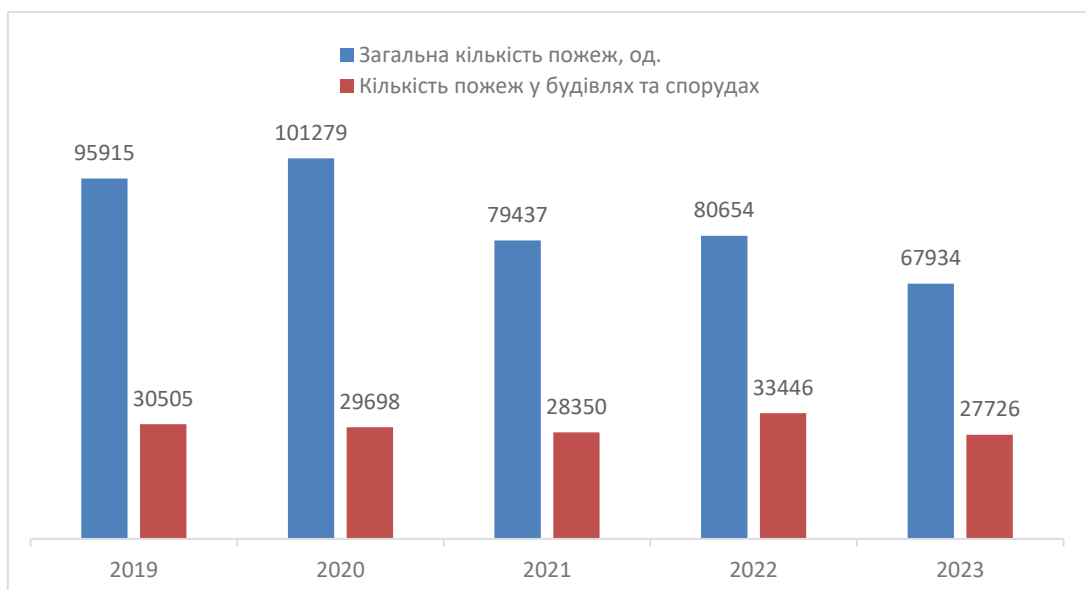


Рис. 1. Статистичні дані про кількість пожеж в Україні за 2019–2023 роки

і віконних прорізів можливе підвищення температури до небезпечного для людей рівня в приміщеннях, де знаходиться зона горіння й у поруч розташованих приміщеннях; наявність великого горючого навантаження; поверхневе горіння матеріалів і речовин; швидке поширення вогню й диму через значну кількість дверей, вікон, побутових і технологічних прорізів, комунікацій, балконів тощо; утрата цілісності й несучої здатності будівельних конструкцій, їхнє обвалення та поширення вогню; наявність матеріалів, під час горіння яких виділяються небезпечні хімічні речовини; наявність електромереж, електроприладів та обладнання під напругою з пошкодженою електроізоляцією [2].

Такі умови вимагають від особового складу пожежно-рятувальних підрозділів не лише гасіння та проведення аварійно-рятувальних робіт, а й урахування ризиків для власної безпеки при виконанні завдань за призначенням. Додатково важливо відзначити, що сучасні керівні документи неповною мірою (поверхово) розкривають суть проведення гасіння пожеж у мансардних приміщеннях житлових будівель [2; 3], що ускладнює роботу пожежно-рятувальним підрозділам і керівникам гасіння пожеж в організації швидкого й безпечного гасіння пожеж у приміщеннях такого типу.

Основні керівні документи, які б могли допомогти з вирішенням цієї проблеми, регламентують лише гасіння приміщень горищного типу за принципом проведення розвідки із зовнішнього та внутрішнього боків і після того стволи для гасіння вводити сходовими клітками через двері, що ведуть на горище [2]. Також основним завданням є організація та створення протипожежних розривів у покритті в разі швидкого поширення вогню, за вихідні рубежі варто використовувати вогнестійкі зони та протипожежні стіни, зосереджуючи в цих місцях необхідну кількість сил і засобів, проте це також неповністю вирішує суть цієї проблематики, так як є необхідність залучати велику кількість особового складу пожежно-рятувальних підрозділів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

На підставі аналізу вітчизняних керівних документів і наукових робіт, які регламентують необхідність і порядок проведення гасіння пожеж у житловому секторі, можемо констатувати, що вони неповною мірою (поверхово) розкривають суть проведення гасіння. Невчасно й неправильно організоване гасіння пожеж у житловому секторі призводить до значного збільшення часу ліквідації пожежі, наражає на небезпеку потерпілих під час проведення евакуаційних заходів, ускладнює

ведення оперативних дій у непридатному для дихання середовищі ланками ГДЗС [2; 3; 4].

Згідно з аналізом закордонних публікацій, застосування стволів-пробійників є однією з першочергових оперативних дій пожежно-рятувальних підрозділів під час гасіння пожеж мансардних приміщень у житловому секторі [5]. Цей підхід сприяє швидкому отриманню доступу до осередку загоряння, особливо в умовах обмеженого доступу через специфіку будівельних конструкцій. На основі цього аналізу можемо провести порівняння й узагальнення методів застосування стволів-пробійників у житловому секторі для ліквідації пожеж. Використання цих стволів охоплює різні сценарії їхнього використання для створення доступу до осередку пожежі через двері, дах чи стіни з метою оперативного гасіння й рятування людей. Аналізуючи цей підхід, ми можемо стверджувати, що цей метод може допомогти нам визначити оптимальне використання стволів-пробійників під час гасіння мансардних приміщень, що сприятиме розробленню кращих методик для ліквідації пожеж і підвищення безпеки в цих умовах.

Мета статті (постановка завдання). Метою роботи є вдосконалення гасіння пожеж мансардних приміщень у житловому секторі.

Для вирішення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати вітчизняні та закордонні джерела, що регламентують порядок організації гасіння пожеж у мансардних приміщеннях у житловому секторі.

2. Проведення аналізу необхідного пожежно-технічного обладнання та способів гасіння пожеж мансардних приміщень.

3. Розроблення методики, яка б регламентувала порядок гасіння мансардних приміщень.

Виклад основного матеріалу. У статті проаналізовано вітчизняні й закордонні джерела, що регламентують порядок організації гасіння пожеж у мансардних приміщеннях, проведено аналіз необхідного пожежно-технічного обладнання та способів гасіння пожеж у будівлях із мансардними приміщеннями.

Український житловий сектор налічує понад 180 тисяч багатоквартирних будинків і 6,5 мільйона приватних будинків. Згідно з працею [6], кількість поверхів у будинках, що розташовані на територіях садибної забудови, не дозволяє перевищувати трьох поверхів без урахування мансарди. При цьому мансардою називається будь-який поверх у горищному просторі, чия фасадна частина повністю або частково утворена нахиленими або складними покрівлями [7]. Мансардні

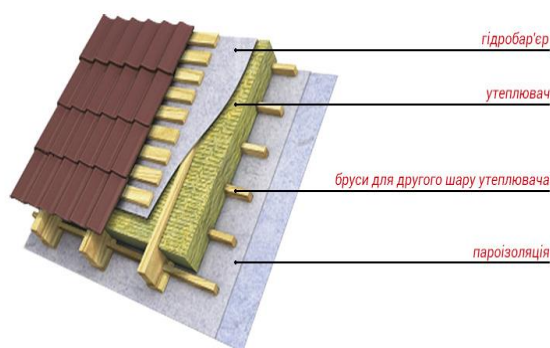
приміщення характеризуються своєрідною конструкцією та характерною поверховістю, тобто декілька повноцінних поверхів (переважно 1 або 2) та один неповноцінний поверх для оптимального використання простору під дахом. Основними елементами конструкції мансард є перекриття даху, теплоізоляційні матеріали й обробка приміщень. Перекриття даху мансарди може складатися з металевого листа, черепиці та подібних покрівельних матеріалів. Під покрівельним матеріалом розміщується шар теплоізоляційного матеріалу, який може бути виконаний із пінопласту, мінеральної вати або інших сучасних теплоізоляційних матеріалів. Теплоізоляція мансардних приміщень є важливою частиною з точки зору комфорту й енергоефективності будівлі. Основна мета теплоізоляції полягає в збереженні тепла в приміщенні в холодний період і у відведенні надмірної теплоти влітку, створюючи при цьому комфортні умови проживання або роботи. Залежно від регіону де розміщується мансардне приміщення, використовують різну товщину теплоізолювальних матеріалів (рисунк 2 а). Відповідно до чинних у нашій країні норм, виділяють дві температурні зони, до зони 1 зараховують основну частину областей України, а до зони 2 – південні приморські регіони й Закарпаття, на основі цього проводять розрахунок товщини теплоізолювальних матеріалів, які в подальшому будуть впливати на пожежогасіння [8]. Окрім цього, мансардні приміщення можуть мати специфічні конструкційні особливості, такі як нахил стін і стелі, що відповідають конструкції даху. Додатковою особливістю можуть бути великі вікна, які додають цьому простору світла (рисунк 2 б).

Потрапляння одного з небезпечних елементів продуктів горіння теплоізолювальних матеріалів в організм людини навіть у незначній

концентрації викликає отруєння. Коли гази, пари, альдегіди, смоли й дрібні частинки на пожежі змішані й розігріті, їх смертельний вплив на живий організм різко посилюється, тому потрібно розуміти, що при 0,15% концентрації CO в об'ємі житлового приміщення людина може отримати тяжке отруєння або взагалі загинути [9]. Через цей фактор основною небезпекою для життя та здоров'я людей є не лише можливість обвалу конструкцій під час евакуації з місця пожежі, а й токсичні речовини, що утворюються під час горіння.

Загальний процес розвитку пожежі в мансардних приміщеннях є досить дослідженим явищем, проте повністю передбачити всі можливі сценарії й наслідки її розвитку неможливо. Однак ми можемо зрозуміти загальне уявлення, як зазвичай прогресує пожежа в таких умовах. Дослідження закордонних публікацій дають змогу виділити основні етапи розвитку пожежі в мансардних приміщеннях житлового сектору, а саме в невеликих будинках [5]. Це може бути корисним для керівника гасіння пожежі (далі – КГП) при вивченні ситуації на місці або використанні спеціального обладнання для гасіння пожежі [3].

Кожна пожежа рухається в напрямку, з якого надходить повітря, особливо якщо це єдиний вентиляційний отвір. Якщо існує більше отворів, а один із них є вихідним отвором, то прямування нагрітих газів до нього також призведе до розповсюдження пожежі в цьому напрямку. Урешті-решт, коли існує вимушений потік (наприклад, через вітер), тоді поширення виникне переважно в напрямку руху потоку (конвекція продуктів згорання), але буде наявне повільніше поширення в протилежному напрямку (теплове випромінювання). Таким чином, шляхи газообміну будуть утворюватися в просторі будівлі між отворами, які є вхідними для потоку повітря й вихідними



а)



б)

Рис. 2. Мансардне приміщення в житловому секторі:

- а) будова покрівлі мансардного приміщення;
- б) загальний вигляд мансардного приміщення

для потоку продуктів горіння. Можуть виникати потоки однобічні й багатобічні, а також різні конфігурації потоків, які поширюються як по горизонталі, так і по вертикалі (рис. 3, а), б)) [5].

Ураховуючи вищенаведене, можемо виділити такі види газообміну:

- однобічний газообмін (наявність більше ніж одного вентиляційного отвору);
- двобічний газообмін (наявний один вентиляційний отвір);
- вимушений газообмін (використання димовсмоктувача, нагнітача, розпилених струменів води та напрямку вітру);
- відсутність газообміну (вогнище пожежі ізольоване).

Розвиток пожежі в мансардному приміщенні може залежати від багатьох чинників. На початку розвитку такої пожежі керує паливо, це означає, що на динаміку процесу згорання впливає лише кількість, вид і характеристики палива. Достатня кількість кисню наявна постійно й у кожному місці процесу горіння. Такий стан утримується впродовж певного часу, протягом якого потужність пожежі зростає. Пожежа продовжує збільшувати свою динаміку, утворюється все більше продуктів згорання, оскільки зростає зона горіння. Задимлення призводить до утворення та зниження нейтральної зони, тим самим обмежується простір, через який до пожежі надходить кисень із повітрям і пожежа стає керованою вентиляцією. Настає критичний момент у розвитку внутрішньої пожежі. Із цього моменту всі зміни у вентиляції суттєво впливатимуть на динаміку й розвиток пожежі [10].

На стадії раннього розвитку пожежі температура буде поступово збільшуватися за умови наявності достатньої кількості свіжого повітря (кисню) за рахунок відчинених дверей, вікон тощо. Це означає, що з точки зору проведення робіт із порятунку людей на пожежі всі сили й засоби

повинні бути задіяні й спрямовані на гасіння або унеможливлення поширення полум'я по всій площині поверхні в закритому приміщенні без змоги потрапляння окисника.

У разі настання різкого охоплення вогнем наступною стадією розвитку пожежі є «повноцінний розвиток пожежі», який буде характеризуватися значним задимленням суміжних приміщень, високою температурою, загрозою поширення пожежі на суміжні приміщення, як наслідок, можливістю обвалу перекриття й несучих конструкцій будівлі. Тому надзвичайно важливо направляти сили та засоби з найменшим ризиком для особового складу. Значна кількість випадків гасіння пожеж пов'язана з небезпечним впливом на особовий склад небезпечних чинників пожежі, зокрема дія високих температур і диму значно ускладнює проведення рятувальних робіт і пожежогасіння. Вагомим тактичним способом зниження такого впливу на особовий склад пожежно-рятувальних підрозділів є гасіння пожежі ззовні, зменшуючи концентрацію окисника в горючому середовищі.

Для досягнення найбільш ефективного гасіння пожежі в мансардному приміщенні потрібно виправити та додати низку таких факторів:

1. Зменшення концентрації окисника в повітрі.
2. Зменшення кількості особового складу для ліквідації пожежі.
3. Оперативність ведення дій.
4. Мінімізація пролитої води.

Проводячи аналіз способів гасіння пожежі в мансардних приміщеннях, відповідно до керівних документів, можемо відзначити два основні способи [2; 3]:

1. Подачу ствола на гасіння по сходовій клітині.
2. Подачу ствола на гасіння по висувній драбині.

Гасіння пожежі за допомогою висувної драбини може бути ефективним методом у деяких випадках, але також має власні особливості.

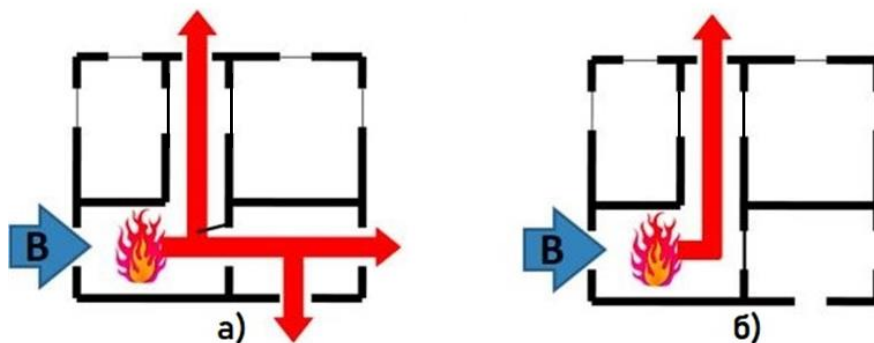


Рис. 3. Можливі шляхи й потоки газообміну [5]:

- а) багатобічний газообмін;
- б) однобічний газообмін

Ефективність такого методу полягає в тому, що доступ до пожежі на даху або в мансардному приміщенні стає більш доступним. Особовий склад пожежно-рятувальних підрозділів може скористатися висувною драбиною, щоб піднятися на дах і використати інструменти для гасіння або локалізації вогню. Це дає змогу пожежним-рятувальникам працювати й безпосередньо контролювати рух вогню, особливо у випадках, коли пожежа поширюється з нижніх поверхів до даху або по стінах будівлі. Проте цей підхід має свої труднощі. Доступність до даху може бути ускладненою через різні фактори, такі як висота будівлі, стан даху, унаслідок чого може бути обвалення конструкції, проведення гасіння за таким принципом здійснює велику кількість особового складу, також великим та основним недоліком такого методу гасіння є велика кількість проливої води, яка може затопити нижні поверхи, тим самим завдати великих матеріальних збитків. Оцінювання ситуації та розуміння умов є важливими для визначення ефективності цього методу гасіння. Пожежні підрозділи повинні мати не лише відповідну підготовку для роботи на даху, а й усі необхідні засоби безпеки й обладнання для ефективного втручання (рисунк 4).

Зважаючи на пожежі в мансардних приміщеннях, гасіння через сходову клітину має свої суттєві недоліки. Піднімаючись сходовою клітиною, ланка ГДЗС може швидко досягти місця загоряння. Це може бути дуже ефективно, особливо якщо пожежа локалізована на верхніх поверхах чи в мансардному приміщенні. Такий метод дає змогу контролювати поширення вогню й реагувати оперативіно. Проте існує низка ризиків, які можуть призвести до пошкодження конструкції будівлі, зокрема сходової клітини, створюючи небезпеку обвалу, тим самим ускладнюючи

доступ до осередку пожежі, цей метод також передбачає залучення значної кількості особового складу та вимагає альтернативних шляхів гасіння. Крім того, якщо вогонь швидко поширюється, гасіння знизу є не ефективним, оскільки він уже встиг поширитися на вищі поверхи до прибуття пожежно-рятувальних підрозділів.

Оцінювання ситуації та ризиків важливе для визначення найбільш ефективного методу гасіння пожежі через сходову клітку (рисунк 4.1).

Проте, опираючись на закордонні публікації, ми можемо відзначити один із альтернативних способів гасіння стволами-пробійниками, які забезпечують ефективну локалізацію пожежі в мансардних приміщеннях (рисунк 5) [5].

Стволи-пробійники – це ефективний метод гасіння пожеж у мансардних приміщеннях, оскільки вони дають змогу подати засіб для гасіння без проникнення саме в мансардне приміщення цей метод буде особливо корисний, коли доступ до місця пожежі обмежений або ускладнений через особливості будівлі, наприклад, у мансардних приміщеннях із вузькими або складними доступами. Стволи пробійники дають змогу подавати вогнегасну речовину або інший засіб для гасіння пожежі через стелю чи інший бар'єр різними розпиленнями, що може не лише забезпечити гасіння, а й унеможливити поширення горіння за рахунок охолодження приміщення, при тому не потребуючи безпосередньої присутності людини в зоні загоряння. Це може знизити ризик для ланки ГДЗС і прискорити реагування на пожежу, також ефективність цього методу полягає в точності й швидкості подачі засобу для гасіння, а також у можливості охоплення навіть важкодоступних місць у мансардних приміщеннях. Використання стволів-пробійників дає змогу зменшити час реагування особового складу, мінімізувати

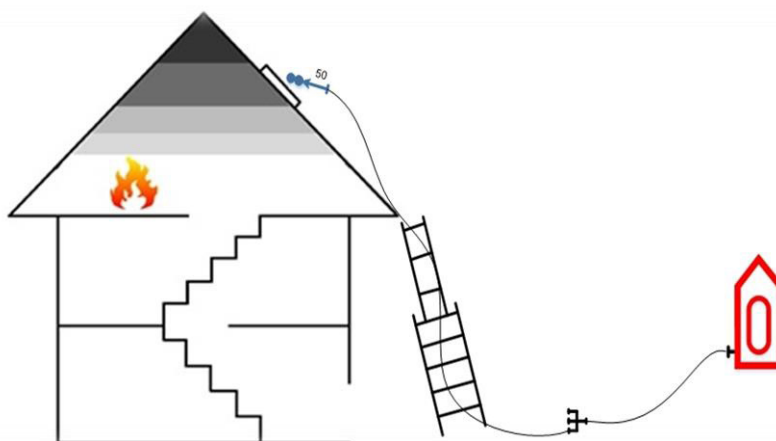


Рис. 4. Гасіння мансардного приміщення за допомогою висувної драбини

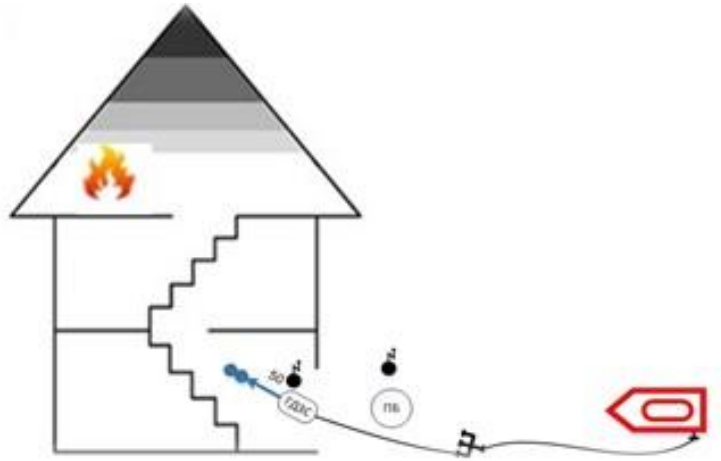


Рис. 4.1. Гасіння мансардного приміщення через сходову клітку

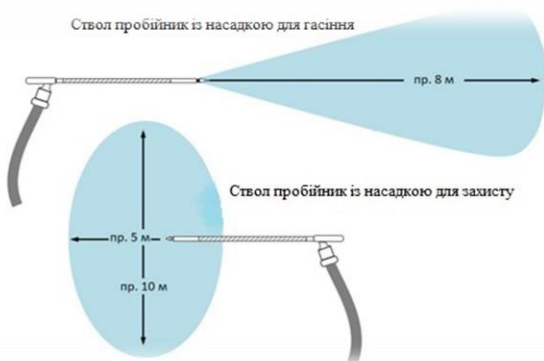


Рис. 5. Загальний вигляд ствола-пробійника

ризик для життя та здоров'я пожежним-рятувальникам.

Деякі стволи-пробійники, зважаючи на масивну й довговічну конструкцію, можуть вбиватися (молотом або обухом сокири) через конструктивні елементи різних видів, і вони можуть це витримати майже без пошкоджень. Інші мають менш витривалу конструкцію, вимагають виконання отвору механічним шляхом у більш міцних матеріалах. Перевагою перших є міцність, других – найчастіше легкість використання (потрібний менший отвір для введення ствола пробійника) і краща якість розпиленого струменю [5].

Розглянувши закордонні публікації, де продемонстровано основні принципи та способи реалізації гасіння пожеж у мансардних приміщеннях житлового сектору, можемо зробити висновок, що є два основні методи гасіння стволами-пробійниками (рисунок 6), а саме:

1. Подача вогнегасної речовини, зокрема водяного туману (тонко розпилений струмінь під кутом 90°) на захист;

2. Подача водяного туману (тонко розпилений струмінь під кутом 35° – 40°) на гасіння;

Подача вогнегасної речовини такими методами проводиться за допомогою спеціальних насадок, які формують тонко розпилений струмінь так, щоб можна було б досягти бажаних результатів (рисунок 6).

Якщо порівняти способи проведення гасіння пожеж мансардних приміщень у житловому секторі в Україні й закордоном, то бачимо, що стволи-пробійники мають іншу назву, а саме «туманні стволи». Стосовно терміна «туманні стволи», хоча він і відсутній у нормативній базі України, але водночас використовується країнами Європейського Союзу, США, Польщі тощо. Сам термін «туманні стволи» включає необхідність і правильність проведення пожежогасіння чи ізолювання пожежі в огороженнях під час проведення оперативних

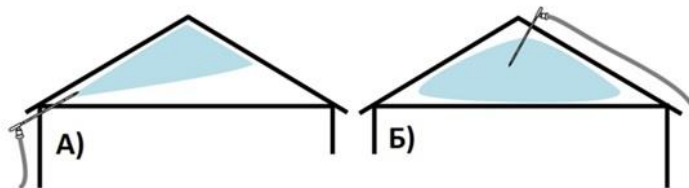


Рис. 6. Приклади застосування стволів-пробійників під час гасіння пожежі в мансардному приміщенні:

варіант А) – використання насадки для гасіння;

варіант Б) – використання насадки для захисту

дій пожежно-рятувальними підрозділами з метою успішної та безпечної ліквідації пожежі.

Ізолювання пожежі знижує швидкість потоку газів, що зменшує кількість тепла, яке переноситься шляхом конвекції. Застосування стволів-пробійників є тактикою, завдяки якій КПП може досягти цілей на певному етапі гасіння пожежі. Прикладом проведення гасіння може бути пробивання стін, виготовлених із легких матеріалів, або гасіння з боку даху, де доступ до пожежі є найлегшим способом, щоб запобігти загорянню пожежного навантаження (рисунок 7).



Рис. 7. Принцип гасіння стволом-пробійником мансардного будинку з боку стіни

Ураховуючи вищенаведене, а також аналіз шляхів і видів газообміну під час гасіння пожеж в огороженні, можемо стверджувати, що в більшості випадків ці пожежі контролюються вентиляцією. Ключовим питанням за таких умов стає доступ повітря в зону горіння, таким чином, використання стволів-пробійників набуває максимальної ефективності за рахунок подачі розпиленних і тонко розпиленних струменів води на гасіння або захист в осередок горіння за умови повної або часткової ізоляції пожежі. Якщо поширення

пожежі відбувається у вище (мансардні приміщення) та нижче розташовані поверхи, пропонується застосування комбінованого способу гасіння, одночасне використання ланки ГДЗС для гасіння і ствола-пробійника для захисту мансардного приміщення за умови роботи на пожежі не менше ніж два відділення (рисунок 9). Відповідно до додатка 7 «Умовні позначення та знаки» [2], не передбачено позначень ствола-пробійника, так пропонується наступне позначення ствола пробійника з насадками для гасіння та захисту (рисунок 8).

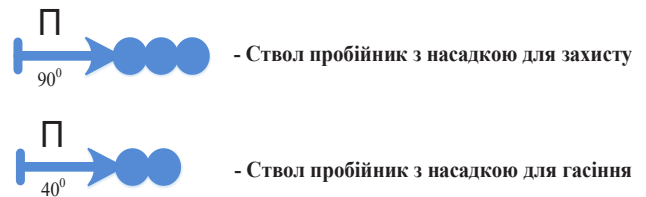


Рис. 8. Позначення ствола-пробійника з насадками

Висновки. На основі теоретичних досліджень газообміну та його управління під час пожеж в огороженні можна вважати, що фундаментальний принцип гасіння за допомогою ствола-пробійника здійснюється з метою залучення меншої кількості особового складу, зменшення кількості пролитої води й зменшення концентрації окисника та горючих газів. Методи роботи, вибір засобів і тактика дій пожежно-рятувальних підрозділів залежать від поставленої мети, завдання й тактичних можливостей підрозділів, які прибули для гасіння пожежі. Проаналізувавши закордонні та вітчизняні роботи щодо способів проведення гасіння пожеж мансардних приміщень у житловому секторі, бачимо, що в Україні немає методів і досвіду гасіння таких пожеж

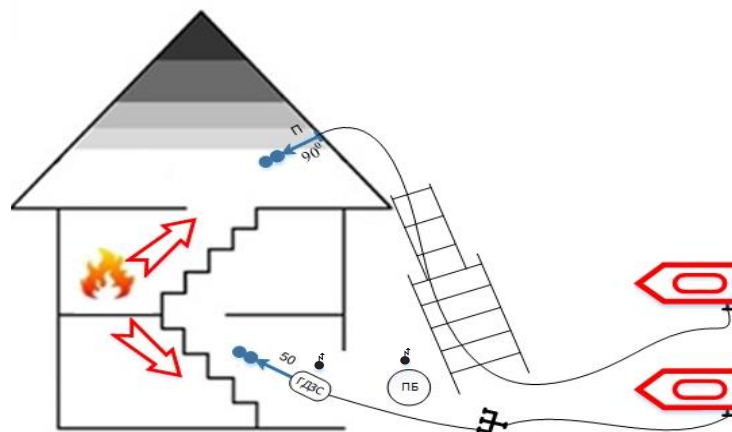


Рис. 9. Гасіння мансардного приміщення комбінованим способом

стволами-пробійниками. Беручи до уваги можливі варіанти виникнення й розповсюдження таких пожеж із найтяжчими наслідками, запропонували комбінований спосіб гасіння мансардних приміщень.

Надалі буде детально розглянуто питання стволів-пробійників (тактико-технічні характеристики, а саме: витрата води, геометричні параметри, маса тощо) і принципів гасіння за допомогою них. На основі проведених досліджень планується розроблення методичних рекомендацій для проведення гасіння пожеж у будівлях із мансардними приміщеннями, а також тренажеру для покращення підготовки пожежних-рятувальників до гасіння будівель із мансардними приміщеннями й подібних до них об'єктів.

Список літератури

1. Аналітична довідка про пожежі та їх наслідки в Україні з 2019–2023 р. URL: <https://idundcz.dsns.gov.ua/statistika-pozhezh/analitichni-materiali>.
2. Про затвердження Статуту дій у надзвичайних ситуаціях органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту та Статуту дій органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту під час гасіння пожеж : Наказ МВС від 26.04.2018 № 340 зі змінами, унесеними згідно з наказами Міністерства внутрішніх справ від 18.10.2021 № 768, від 18.04.2024 № 251.
3. Довідник керівника гасіння пожежі / Український науково-дослідний інститут цивільного захисту. Київ : ТОВ «Літера-Друк», 2016. 320 с.
4. Основи тактики гасіння пожеж : навчальний посібник / В. В. Сировий, Ю. М. Сенчихін, А. А. Лісняк, І. Г. Дерев'яно. Харків : НУЦЗУ, 2015. 216 с.
5. Шимон Кокот. Гасіння внутрішніх пожеж : посібник / переклад з пол. В. Дубасюка. Львів, 2022. 319 с.
6. ДБН Б.2.2-12:2019. Планування та забудова територій.
7. ДБН В.2.2-15:2019. Житлові будинки. Основні положення.
8. ДБН В.2.6-31:2016. Теплова ізоляція будівель.
9. Ковалишин В. В., Луц В. І., Пархоменко Р. В. Основи підготовки газодимозахисника : навчальний посібник. Львів : ЛДУБЖД, 2015. 390 с.
10. Шимон Кокот. Вентилятори і вентиляція в пожежній охороні : посібник / переклад з пол. В. Дубасюка. Львів, 2022. 72 с.

© В. І. Луц, Є. В. Кобко, Я. Б. Великий, Б. А. Романик, 2024.

Оглядова стаття.

Надійшла до редакції 21.11.2024.

Прийнято до публікації 18.12.2024.

References

1. Analytical reference on fires and their consequences in Ukraine from 2019–2023]. Retrieved from: <https://idundcz.dsns.gov.ua/statistika-pozhezh/analitichni-materiali>. [in Ukrainian].
2. Nakaz MVS vid 26.04.2018 r. № 340 iz zminamy vnesenymy zghidno z Nakazamy Ministerstva vnutrishnikh sprav № 768 vid 18.10.2021r., № 2 51 vid (18.04.2024 r.) «Pro zatverdzhennia Statutu dii u nadzvychainykh sytuatsiiakh orhaniv upravlinnia ta pidrozdiliv Operatyvno-riatuvalnoi sluzhby tsyvilnoho zakhystu ta Statutu dii orhaniv upravlinnia ta pidrozdiliv Operatyvno-riatuvalnoi sluzhby tsyvilnoho zakhystu pid chas hasinnia pozhezh». [«On approval of the Charter of actions in emergency situations of management bodies and units of the Operational and Rescue Service of Civil Protection and the Charter of actions of management bodies and units of the Operational and Rescue Service of Civil Protection during fire extinguishing»]. [in Ukrainian].
3. Ukrainyskyi naukovo-doslidnyi Instytut tsyvilnoho zakhystu. Dovidnyk kerivnyka hasinnia pozhezhi (2016). [Ukrainian Research Institute of Civil Protection. Directory of the fire extinguishing manager]. Kyiv: Litera-Druk LLC, 320 p. [in Ukrainian].
4. Syrovyi, V. V., Senchikhin, Yu. M., Lisnyak, A. A., & Derevyanko, I. G. (2015). Osnovy taktyky hasinnia pozhezh [Basics of firefighting tactics]: training manual Kharkiv: NUZZU, 216 p. [in Ukrainian].
5. Shimon Kokot (2022). Hasinnia vnutrishnikh pozhezh [Extinguishing internal fires]: manual, translation from gender. Volodymyr Dubasyuk. Lviv: 319 p. [in Ukrainian].
6. DBN B.2.2-12:2019. Planuvannia ta zabudova terytorii [Planning and development of territories]. [in Ukrainian].
7. DBN V.2.2-15:2019. Zhytlovi budynky. Osnovni polozhennia [Residential buildings. Basic provisions]. [in Ukrainian].
8. DBN V.2.6-31:2016. Teplova izoliatsiia budivel. [Thermal insulation of buildings]. [in Ukrainian].
9. Kovalishin, V. V., Lushch, V. I., & Parkhomenko, R. V.(2015). Osnovy pidhotovky hazodymozakhysnyka: navchalnyi posibnyk [Fundamentals of gas and smoke protector training]: textbook. Lviv: LDUBZD. 390 p. [in Ukrainian].
10. Shimon Kokot (2022). Ventyliatory i ventyliatsiia v pozhezhnii okhoroni: posibnyk, pereklad z pol. [Fans and ventilation in the fire department: manual, translation from gender]. Volodymyr Dubasyuk. Lviv: 72 p. [in Ukrainian].



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.45.2024.08>

П. В. Пастухов, О. І. Лавренюк, Б. М. Михалічко
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
м. Львів, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3140-1101> – П. В. Пастухов
<https://orcid.org/0000-0003-4509-2896> – О. І. Лавренюк
<https://orcid.org/0000-0002-5583-9992> – Б. М. Михалічко
✉ olaw@ukr.net

ВПЛИВ МЕТАЛООРГАНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ НА ГОРЮЧИСТЬ І ДИМОУТВОРЮВАЛЬНУ ЗДАТНІСТЬ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ЕПОКСИДНИХ СМОЛ

Однією з характерних особливостей горіння і тління полімерних матеріалів, у тому числі й матеріалів на основі епоксидних смол, є висока інтенсивність димоутворення та виділення великої кількості токсичних продуктів. Це негативно впливає не лише на стан довкілля, а й на організм людини. Згідно зі статистичними даними, майже 70% летальних випадків на пожежах спричинені саме отруєнням токсичними продуктами термічного розкладу й горіння горючих матеріалів. Тому дослідження, спрямовані на пошук нових ефективних речовин задля зниження горючості та димоутворювальної здатності полімерних матеріалів, які задовольняли б сучасним вимогам, є вкрай актуальними.

Мета статті – отримання нових металоорганічних комплексів і виявлення закономірностей їх впливу на горючість і димоутворювальну здатність при полум'яному горінні і тлінні епоксиполімерів.

Металоорганічні комплекси й металкоординовані епоксіамінні композиції отримували прямою взаємодією відповідних компонентів. Горючість епоксіамінних композицій оцінювали згідно з ДСТУ 8829:2019 (п. 7.3), а димоутворювальну здатність – згідно з ДСТУ 8829:2019 (п. 7.19).

Розроблено технологію отримання металоорганічних комплексів і металкоординованих епоксіамінних композицій. Досліджено вплив синтезованих металоорганічних комплексів на показники групи горючості, інтенсивності димовиділення під час полум'яного горіння і тління епоксіамінних композицій. Установлено, що в аспекті зниження горючості й димоутворювальної здатності епоксіамінні композиції $[\text{Cu}(\text{eda})_2(\text{H}_2\text{O})(\text{Cl})]\text{Cl}$ є менш ефективним порівняно з $[\text{Cu}(\text{eda})_2(\text{H}_2\text{O})(\text{F})]\text{F}$. Виявлено, що введення в епоксіамінну композицію $[\text{Cu}(\text{eda})_2(\text{H}_2\text{O})(\text{F})]\text{F}$ призводить до зниження максимального приросту температури, зменшення втрати маси зразків композицій унаслідок горіння та збільшення часу досягнення максимальної температури газоподібних продуктів горіння, дає змогу отримати важкозаймисті полімерні матеріали. Доведено, що $[\text{Cu}(\text{eda})_2(\text{H}_2\text{O})(\text{F})]\text{F}$ проявив себе як ефективна димопрігнічувальна добавка й забезпечив зниження коефіцієнта димоутворення в режимі полум'яного горіння на 38–52%, а в режимі тління на 45–63%. Установлено, що матеріали на основі модифікованих $[\text{Cu}(\text{eda})_2(\text{H}_2\text{O})(\text{F})]\text{F}$ епоксіамінних композицій за ДСТУ 8829:2019 відповідають вимогам групи Д2, тобто є матеріалами з помірно димоутворювальною здатністю.

Отже, доведено перспективність використання металоорганічних комплексів для зниження горючості й димоутворювальної здатності полімерних матеріалів на основі епоксіамінних композицій. Це можна пояснити збільшенням виходу карбонізованого залишку, інтенсифікацією процесу згорання нелетких продуктів розкладу, а також зміною особливостей перебігу процесу термоокисної деструкції в напрямі збільшення концентрації негорючих газоподібних продуктів.

Ключові слова: епоксіамінні композиції, металоорганічні комплекси, антипірени, горючість, димоутворення, полум'яне горіння, тління.

INFLUENCE OF ORGANOMETALLIC COMPLEXES ON THE COMBUSTIBILITY AND SMOKE-FORMING ABILITY OF POLYMERIC MATERIALS BASED ON EPOXY RESINS

One of the characteristic features of combustion and smoldering of polymeric materials, including materials based on epoxy resins, is the high intensity of smoke formation and the release of a large number of toxic products. This has a negative impact not only on the environment but also on the human body. According to statistics, almost 70% of fatalities in fires are caused by poisoning from toxic products of thermal decomposition and combustion of combustible materials. Therefore, research aimed at finding new effective substances to reduce the combustibility and smoke-forming ability of polymeric materials that would meet modern requirements is extremely relevant.

To obtain new organometallic complexes and to reveal the regularities of their influence on the combustibility and smoke-forming ability of epoxy polymers during flame combustion and smoldering.

Organometallic complexes and metal-coordinated epoxy-amine composites were obtained by direct interaction of the corresponding components. The combustibility of the epoxy-amine composites was evaluated according to DSTU 8829:2019 (p. 7.3), and the smoke-forming ability – according to DSTU 8829:2019 (p. 7.19).

A technology for the preparation of organometallic complexes and metal-coordinated epoxy-amine composites has been developed. The influence of the synthesized organometallic complexes on the combustibility group indices, the intensity of smoke emission during flame combustion and smoldering of epoxy-amine composites was investigated. It has been established that in terms of reducing the combustibility and smoke-forming ability of epoxy-amine composites, $[\text{Cu}(\text{eda})_2(\text{H}_2\text{O})(\text{Cl})]\text{Cl}$ is less effective than $[\text{Cu}(\text{eda})_2(\text{H}_2\text{O})(\text{F})]\text{F}$. It was found that the introduction of $[\text{Cu}(\text{eda})_2(\text{H}_2\text{O})(\text{F})]\text{F}$ into the epoxy-amine composite leads to a decrease in the maximum temperature increase, a decrease in the mass loss of the composite samples due to combustion, and an increase in the time to reach the maximum temperature of gaseous combustion products, and makes it possible to obtain difficult-to-combustible polymeric materials. It was proved that $[\text{Cu}(\text{eda})_2(\text{H}_2\text{O})(\text{F})]\text{F}$ proved to be an effective smoke suppressant additive and provided a decrease in the smoke formation coefficient in the flame combustion mode by 38–52%, and in the smoldering mode by 45–63%. It has been established that materials based on modified $[\text{Cu}(\text{eda})_2(\text{H}_2\text{O})(\text{F})]\text{F}$ epoxy-amine composites according to DSTU 8829:2019 meet the requirements of group D2, i.e., are materials with moderate smoke-forming ability.

The prospects of using organometallic complexes to reduce the combustibility and smoke-forming ability of polymeric materials based on epoxy-amine composites have been proved. This can be explained by an increase in the yield of carbonized residue, intensification of the combustion process of non-volatile decomposition products, as well as a change in the features of the thermo-oxidative degradation process in the direction of increasing the concentration of non-combustible gaseous products.

Key words: epoxy-amine composites, organometallic complexes, flame retardants, combustibility, smoke formation, flame combustion, smoldering.

Постановка проблеми. Однією з характерних особливостей горіння і тління полімерних матеріалів, у тому числі й матеріалів на основі епоксидних смол, є висока інтенсивність димоутворення та виділення великої кількості токсичних продуктів. Схильність до горіння, склад продуктів горіння й кількість диму, який виділяється в результаті горіння і тління полімерів, залежать від низки факторів, насамперед від хімічної будови макромолекул. Наприклад, при горінні полімерів аліфатичної будови виділяється незначна кількість диму, хоча такі полімери є легкозаймистими. Полімерні матеріали, які містять у структурі атоми галогенів, навпаки, є важкозаймистими, але їх горіння супроводжується значним димовиділенням. Полімери з ароматичними замісниками

легкозаймисті й мають високу димоутворювальну здатність. Полімери з ароматичними групами в основному ланцюзі є менш горючими й виділяють при горінні менше диму, ніж полімери з ароматичними групами в бічних ланцюгах [1]. Важливу роль у димоутворенні відіграють також умови процесу горіння, а саме: потужність теплового потоку, який діє на поверхню полімерного матеріалу, дифузія кисню в зону горіння, тиск, вологість і хімічний склад середовища, у якому протікає горіння. Відтак горючість, димоутворення та склад продуктів горіння полімерів не завжди можуть бути прогнозованими.

Утім, як свідчать літературні дані [2], полімерні матеріали на основі епоксидних смол у процесі горіння є джерелом міграції в навколишнє

середовище карбон (II) і карбон (IV) оксидів, епіхлоргідрину, хлорбензену, дифенілпропану, дибутилфталату, ароматичних вуглеводнів (бензену, етилбензену, ізопропілбензену, толуену, фенолу, етилфенолу, пропілфенолу, ізопропілфенолу, крезолу, ксилену, мезитилену тощо), гідрогенхлориду, формальдегіду, нітроген оксидів. Виділення таких хімічних речовин навіть у невеликих кількостях негативно впливає не лише на стан довкілля, а й на організм людини. Згідно зі статистичними даними, майже 70% летальних випадків на пожежах спричинені саме отруєнням токсичними продуктами термічного розкладу й горіння горючих матеріалів. Тому дослідження, спрямовані на пошук нових ефективних речовин задля зниження горючості та димоутворювальної здатності полімерних матеріалів, які задовольняли б сучасним вимогам, є вкрай актуальними.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Найчастіше для зниження горючості й димоутворення полімерних матеріалів, у тому числі й матеріалів на основі епоксидних смол, застосовують різноманітні хімічні добавки. Усе частіше із цією метою використовують реакційноздатні сполуки [3; 4]. Вони мають низку переваг над інертними добавками, тоді як обсяги застосування інертних антипіренів постійно знижуються. Завдяки наявності в структурі функційних груп реакційноздатні добавки, як правило, вступають у реакції з полімером на стадії синтезу, водночас добавки адитивного типу можуть лише механічно суміщатися з полімером.

Однією з численних груп речовин, які застосовують не лише для зниження димоутворювальної здатності полімерних матеріалів на основі епоксидних смол, а й горючості в цілому, є метало-вмісні сполуки [5–7]. До таких речовин, зокрема, належать мінеральні наповнювачі: порошки металів, оксиди та фториди металів, які стійкі до температури 1000°C, і гідроксиди, карбонати, гідрокарбонати металів, які розкладаються з поглинанням тепла за температур нижчих за 400–500°C. Як правило, такі речовини є інертними до полімерної матриці. Їх ефективність невисока, оскільки ці речовини практично не спроможні впливати на якісний і кількісний склад продуктів термічного розкладу полімерного матеріалу й утворення твердого карбонізованого залишку в умовах горіння.

Такі добавки можуть призвести лише до незначного зниження горючості епоксиполімерного матеріалу, в основному за рахунок додаткових витрат тепла, необхідних на нагрівання добавки в процесі термічного розкладу. Хімічні речовини цього класу не спроможні дезактивувати вільно радикальні процеси, які протікають у полум'ї.

Відтак помітна ефективність при застосуванні мінеральних наповнювачів можлива лише за умови їх високого вмісту в полімері. Однак це негативно відображається на фізико-механічних та експлуатаційних властивостях матеріалів.

Значно ефективнішими є хімічні речовини, які спроможні розкладатися при невисоких температурах. При їх розкладанні й випаровуванні не лише витрачається тепло, що супроводжується зниженням температури поверхні матеріалу, а й виділяються в зону горіння негорючі газоподібні продукти. Вони знижують концентрацію горючих речовин до значень, нижчих за нижню концентраційну межу поширення полум'я, що призводить до припинення полум'яного горіння та зменшення надходження теплового потоку до поверхні матеріалу.

Унаслідок розкладання неорганічних сполук металів утворюються оксиди металів у вигляді нелеткого залишку. Залежно від властивостей оксиду металу, його температури кипіння, пористості й міцності на поверхні епоксиполімеру може утворюватися вогнезахисна плівка. Щільний вогнезахисний шар діє як фізичний бар'єр, запобігаючи дії теплових потоків полум'я на поверхню матеріалу, перешкоджаючи потраплянню в зону горіння легких продуктів розкладу полімеру.

Одними з найновіших і надзвичайно ефективних добавок для зниження димоутворення при горінні епоксиполімерів є комплексні сполуки металів. Особливо привабливими з точки зору зниження горючості й димоутворення можуть виявитися сполуки купруму(II), адже їх атоми металу проявляють неабияку електроноакцепторну спроможність стосовно деяких донорних гетероатомів горючих органічних речовин. Як свідчать результати експериментальних досліджень, наведених у роботах [8–11], використання в епоксіамінних композиціях неорганічних солей купруму(II) призводить до значного покращення деяких показників пожежної небезпеки матеріалів: підвищення температури займання й самозаймання, зниження швидкості поширення полум'я та максимальної температури газоподібних продуктів згоряння, тощо.

Мета статті (постановка завдання) – отримання нових металоорганічних комплексів і виявлення закономірностей їх впливу на горючість і димоутворювальну здатність при полум'яному горінні і тлінні епоксиполімерів.

Експериментальна частина. Як зв'язувальне в роботі використовували епоксидіанову смолу ЕД-20. Металоорганічні комплекси отримували прямою взаємодією неорганічних солей перехідних металів, зокрема купрум(II) флуориду

та купрум(II) хлориду з амінім затвердником епоксидних смол – поліетиленполіаміном (*pepa*), складниками якого є етиленові аміни – етилендіамін (*eda*), діетилентриамін (*deta*), триетилентетраамін (*teta*). Спочатку солі просушували для видалення кристалізаційної води й поміщали в ексикатор. У змішувач уносили відповідні наважки солі й затвердника та перемішували їх. Суміш витримували впродовж декількох днів за кімнатної температури до моменту появи кристалічної фази. Отримані комплекси $[\text{Cu}(\text{eda})_2(\text{H}_2\text{O})(\text{F})]\text{F}$ і $[\text{Cu}(\text{eda})_2(\text{H}_2\text{O})(\text{Cl})]\text{Cl}$ інкорпоровали в епоксидіановий олігомер, постійно перемішуючи. Важливо зазначити, що синтезовані металоорганічні комплекси виконують роль як антипіренів, так і затвердників. Окрім того, готували так звану вихідну немодифіковану епоксіамінну композицію шляхом перемішування епоксидіанового олігомеру із затвердником. Приготовані композиції заливали у форми з алюмінієвої фольги й витримували за кімнатної температури. Повне затверднення композицій відбувалося впродовж 24 год. У таблиці 1 подано позначення, якісний і кількісний склад отриманих композицій.

Для оцінювання горючості епоксіамінних композицій визначали максимальний приріст температури (t_{max}), час досягнення максимальної температури газоподібних продуктів горіння (τ) і втрату маси зразка (Δm) за ДСТУ 8829:2019 (п. 7.3). Вплив синтезованих металоорганічних комплексів, антипіренів-затвердників на інтенсивність димоутворення епоксіамінних композицій оцінювали за значенням коефіцієнта димоутворення в режимі полум'яного горіння і тління. Коефіцієнт димоутворення визначали згідно з ДСТУ 8829:2019 (п. 7.19). У режимі полум'яного горіння випробування проводили при густині теплового потоку $35 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$, а в режимі тління – $25 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$.

Результати та їх обговорення. За результатами визначення показників групи горючості епоксіамінних композицій (таблиці 2) установлено, що зразки на основі немодифікованої композиції згідно з ДСТУ 8829:2019 належать до горючих матеріалів середньої займистості,

оскільки максимальний приріст температури перевищує $60 \text{ }^\circ\text{C}$, утрата маси становить понад 60%, а час досягнення максимальної температури газоподібних продуктів горіння зразків досліджуваних композицій знаходиться в межах від 30 с до 240 с. Варто зазначити, що під дією полум'я газового пальника такі зразки легко займалися й надзвичайно інтенсивно горіли з виділенням великої кількості чорного диму та сажі.

Уведення в епоксіамінну композицію $[\text{Cu}(\text{eda})_2(\text{H}_2\text{O})(\text{F})]\text{F}$ призводить до зміни показників групи горючості. Наприклад, порівняно з немодифікованою епоксіамінною композицією максимальна температура газоподібних продуктів горіння композиції з умістом 22 мас. ч. $[\text{Cu}(\text{eda})_2(\text{H}_2\text{O})(\text{F})]\text{F}$ зменшується на $63 \text{ }^\circ\text{C}$, утрата маси – на 12,4%, а час досягнення максимальної температури газоподібних продуктів горіння збільшується на 92 с. За показниками групи горючості така композиція належить до горючих важкозаймистих матеріалів. Стрімке зниження втрати маси внаслідок горіння зафіксовано для композицій з умістом 42 та 52 мас. ч. $[\text{Cu}(\text{eda})_2(\text{H}_2\text{O})(\text{F})]\text{F}$. Це дає змогу захувати такі зразки до важкогорючих матеріалів, однак за значенням максимального приросту температури не виконується вимога, яка висувається до цієї групи.

Ефективність впливу $[\text{Cu}(\text{eda})_2(\text{H}_2\text{O})(\text{Cl})]\text{Cl}$ порівняно з $[\text{Cu}(\text{eda})_2(\text{H}_2\text{O})(\text{F})]\text{F}$ на показники групи горючості епоксіамінних композицій значно нижча. Зокрема, при вмісті $[\text{Cu}(\text{eda})_2(\text{H}_2\text{O})(\text{Cl})]\text{Cl}$ 26 мас. ч. та 52 мас. ч. на 100 мас. ч. зв'язувального максимальна температура газоподібних продуктів горіння модифікованих композицій порівняно з немодифікованою композицією знижується на $9 \text{ }^\circ\text{C}$ і $37 \text{ }^\circ\text{C}$ відповідно, час досягнення максимальної температури збільшується на 17 с і 22 с, а втрата маси зразків унаслідок горіння зменшується на 7,3% і 11%. Згідно з ДСТУ 8829:2019, за показниками горючості модифіковані купрум(II) хлоридом епоксіамінні композиції належать до горючих матеріалів середньої займистості.

Згідно з результатами проведених експериментальних досліджень (таблиця 3), коефіцієнт

Таблиця 1

Стехіометрія отриманих епоксіамінних композицій

Композиції	Масове співвідношення			
	ЕД-20	<i>pepa</i>	$[\text{Cu}(\text{eda})_2(\text{H}_2\text{O})(\text{F})]\text{F}$	$[\text{Cu}(\text{eda})_2(\text{H}_2\text{O})(\text{Cl})]\text{Cl}$
ЕД/ <i>pepa</i>	100	12	-	-
ЕД/ $[\text{Cu}(\text{eda})_2(\text{H}_2\text{O})(\text{F})]\text{F}$ (22)	100	-	22	-
ЕД/ $[\text{Cu}(\text{eda})_2(\text{H}_2\text{O})(\text{F})]\text{F}$ (42)	100	-	42	-
ЕД/ $[\text{Cu}(\text{eda})_2(\text{H}_2\text{O})(\text{F})]\text{F}$ (52)	100	-	52	-
ЕД/ $[\text{Cu}(\text{eda})_2(\text{H}_2\text{O})(\text{Cl})]\text{Cl}$ (26)	100	-	-	26
ЕД/ $[\text{Cu}(\text{eda})_2(\text{H}_2\text{O})(\text{Cl})]\text{Cl}$ (52)	100	-	-	52

Результати експериментального визначення показників групи горючості епоксіамінних композицій

Показник властивостей композицій	Уміст антипірена-затвердника, мас. ч.					
	–	[Cu(eda) ₂ (H ₂ O)(F)]F			[Cu(eda) ₂ (H ₂ O)(Cl)]Cl	
	0	22	42	52	26	52
Початкова температура випробування, t_0 , °C	200	200	200	200	200	200
Максимальна температура газо-подібних продуктів горіння, t_{max} , °C	867	804	799	792	858	830
Максимальний приріст температури, Δt_{max} , °C	667	604	599	592	658	630
Час досягнення максимальної температури, τ , с	150	242	220	162	167	172
Утрата маси, Δm , %	89,0	76,6	21,9	20,7	81,7	78,0

димоутворення немодифікованої епоксіамінної композиції ЕД/репа в режимі полум'яного горіння дорівнює 644 м²/кг. Уведення в епоксіамінну композицію металоорганічних комплексів призводить до зниження коефіцієнта димоутворення. Лише при вмісті в композиції 52 мас. ч. [Cu(eda)₂(H₂O)(Cl)]Cl на 100 мас. ч. зв'язувального спостерігалось підвищення цього показника до 706 м²/кг. Серед досліджених композицій найнижчу інтенсивність димоутворення під час горіння має композиція з умістом [Cu(eda)₂(H₂O)(F)]F 52 мас. ч. на 100 мас. ч. зв'язувального. Коефіцієнт димоутворення для такої композиції становить 309 м²/кг.

При вивченні впливу металоорганічних комплексів на інтенсивність димовиділення епоксіамінних композицій під час тління виявлено аналогічну тенденцію, як і в режимі полум'яного горіння. Зокрема, при тлінні немодифікованої епоксіамінної композиції коефіцієнт димоутворення становить 902 м²/кг. При введенні в епоксіамінну композицію 52 мас. ч. [Cu(eda)₂(H₂O)(Cl)]Cl на 100 мас. ч. зв'язувального спостерігали підвищення інтенсивності димовиділення, про що свідчить значення коефіцієнта димоутворення 1244 м²/кг. В інших випадках при введенні металоорганічних комплексів коефіцієнт димоутворення знижувався, причому найнижче значення коефіцієнта димоутворення (330 м²/кг) зафіксоване для композиції ЕД/[Cu(eda)₂(H₂O)(F)]F (52).

Важливо відзначити, що для немодифікованої епоксіамінної композиції та композицій модифікованих [Cu(eda)₂(H₂O)(Cl)]Cl коефіцієнт димоутворення в режимі полум'яного горіння і тління є більшим за 500 м²/кг. Отже, згідно з ДСТУ 8829:2019, матеріали на основі цих композицій є матеріалами з високою димоутворювальною здатністю й належать до групи Д3 (таблиця 3). Натомість застосування [Cu(eda)₂(H₂O)(F)]F призводить до зниження коефіцієнта димоутворення в обох режимах до значення, що не перевищує 500 м²/кг. Отже, матеріали на основі епоксіамінних композицій, модифікованих [Cu(eda)₂(H₂O)(F)]F, за ДСТУ 8829:2019, відповідають вимогам групи Д2, тобто є матеріалами з помірно димоутворювальною здатністю.

Передбачено, що зниження димоутворювальної здатності модифікованих епоксіамінних композицій порівняно з немодифікованою композицією як у режимі полум'яного горіння, так і в режимі тління насамперед пов'язано зі збільшенням виходу карбонізованого залишку внаслідок термоокисної деструкції (таблиця 4).

Причиною зниження димоутворювальної здатності епоксіамінних композицій, модифікованих [Cu(eda)₂(H₂O)(F)]F, також є зменшення концентрації бензену в продуктах термоокисної деструкції. Як відомо [12], концентрація бензену може знижуватися завдяки його адсорбції на чистій неокисненій поверхні міді, що зазвичай супроводжується

Таблиця 3

Результати експериментального визначення димоутворювальної здатності епоксіамінних композицій

Показник властивостей композицій	Уміст антипірена-затвердника, мас. ч.					
	–	[Cu(eda) ₂ (H ₂ O)(F)]F			[Cu(eda) ₂ (H ₂ O)(Cl)]Cl	
	0	22	42	52	26	52
Коефіцієнт димоутворення, D_m , м ² /кг:						
– у режимі полум'яного горіння;	644	400	339	309	585	706
– у режимі тління	902	499	491	330	605	1244
Група за димоутворювальною здатністю:						
– у режимі полум'яного горіння;	Д3	Д2	Д2	Д2	Д3	Д3
– у режимі тління	Д3	Д2	Д2	Д2	Д3	Д3

Вплив металоорганічних комплексів на вихід карбонізованого залишку внаслідок термоокисної деструкції матеріалів на основі епоксіамінних композицій

Показник властивостей композицій	Уміст антипірена-затвердника, мас. ч.					
	–	[Cu(eda) ₂ (H ₂ O)(F)F			[Cu(eda) ₂ (H ₂ O)(Cl)Cl	
	0	22	42	52	26	52
Уміст карбонізованого залишку, %	0,80	6,07	7,34	7,92	13,50	12,96

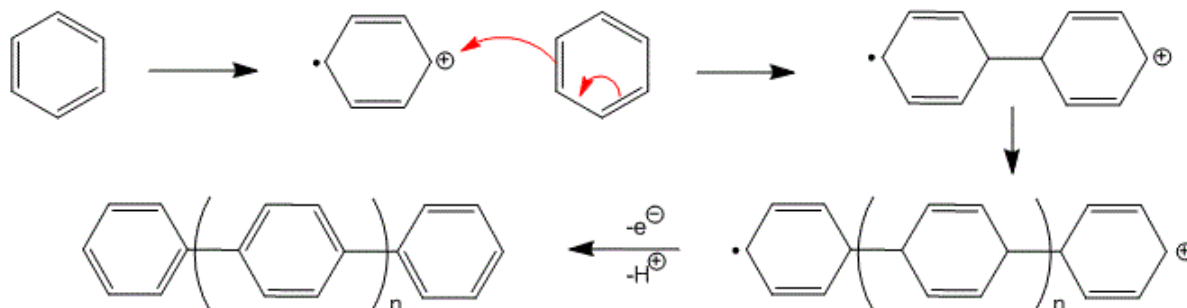
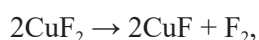


Рис. 1

втратаю його ароматичності. Вірогідність цього механізму можна довести тим, що при термічному розкладанні [Cu(eda)₂(H₂O)(F)F, очевидно, утворюватиметься купрум(II) флуорид, який за температури понад 950 °С втрачає фтор. Надалі внаслідок розкладання виділеного купрум(I) флуориду утворюється мідь:



Окрім того, у кислому середовищі сполуки купруму у вигляді іонів Cu²⁺ можуть каталітично впливати на реакцію дегідрополіконденсації бензену, що супроводжується утворенням поліпарафенілену (рис. 1).

Саме перебіг таких реакцій, імовірно, призводить до збільшення утворення карбонізованого залишку та зменшення бензену в продуктах горіння і тління. Урешті, розглянуті металоорганічні комплекси паралельно зі збільшенням виходу карбонізованого залишку сприяють інтенсивному вигоранню нелетких продуктів деструкції, утворенню великої кількості негорючих газоподібних продуктів термоокисної деструкції, що в підсумку проявляється в зниженні димоутворювальної здатності металкоординованих епоксіамінних композицій.

Висновки. Доведено перспективність використання металоорганічних комплексів для зниження горючості полімерних матеріалів на основі епоксіамінних композицій. Використані в роботі комплекси на основі солей перехідних металів і поліетиленполіаміну проявили себе як ефективні димопригнічувальні добавки й забезпечили зниження коефіцієнта димоутворення

в режимі полум'яного горіння та в режимі тління, що можна пояснити збільшенням виходу карбонізованого залишку, інтенсифікацією процесу згорання нелетких продуктів розкладу, а також зміною особливостей перебігу процесу термоокисної деструкції в напрямі збільшення концентрації негорючих газоподібних продуктів.

Список літератури

1. Dasari A., Yu Zh. -Zh., Cai G.-P., Mai Y.-W. Recent developments in the fire retardancy of polymeric materials. *Progress in Polymer Science*. 2013. Vol. 38 (9). P. 1357–1387.
2. Лавренюк О. І. Компонентний склад та токсичність продуктів термоокисної деструкції епоксіполімерів. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2013. № 7. С. 189–193.
3. Zhi M., Yang X., Fan R., Yue Sh., Zheng L., Liu Q., He Yu. A comprehensive review of reactive flame-retardant epoxy resin: fundamentals, recent developments, and perspectives. *Polymer Degradation and Stability*. 2022. Vol. 201. P. 109976.
4. Kandola B. K., Magnoni F., Ebdon J. R. Flame retardants for epoxy resins: Application-related challenges and solutions. *Journal of Vinyl and Additive Technology*. 2022. Vol. 8. Issue 1. P. 17–49.
5. Chai G., Zhu G., Gao S., Zhou J., Gao Y., Wang Y. On improving flame retardant and smoke suppression efficiency of epoxy resin doped with aluminum trihydroxide. *Advanced Composites Letters*. 2019. Vol. 28. P. 1–12.
6. Longzhen Q., Jianping L., Rongcai X., Baojun Q. Structural Characteristics and Flame-Retardant properties of nanosized magnesium Hydroxide. *Journal of Semiconductors*. 2016. Vol. 24. P. 81–83.

7. Chen M.-J., Lin Y.-C., Wang X.-N., Zhong L., Li Q.-L., Liu Z.-G. Influence of Cuprous Oxide on Enhancing the Flame Retardancy and Smoke Suppression of Epoxy Resins Containing Microencapsulated Ammonium Polyphosphate. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2015. Vol. 54 (51). P. 12705–12713.

8. Lavrenyuk H., Mykhalichko B., Garanyuk P., Mykhalichko O. New copper(II)-coordinated epoxy-amine polymers with flame-self-extinguishment properties: Elaboration, combustibility testing, and flame propagation rate measuring. *Fire and Materials*. 2020. Vol. 44 (6). P. 825–834.

9. Lavrenyuk H., Mykhalichko B. Principles of controlled effects on performance properties of self-extinguishing epoxy-amine composites modified by copper(II) carbonate. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2019. Vol. 5 (126). P. 58–64.

10. Пархоменко В.-П. О., Лавренюк О. І., Михалічко Б. М. Роль антипірена-затвердника у формуванні самозгасаючих епоксіамінних композицій. *Науковий вісник. Серія «Цивільний захист та пожежна безпека»*. 2017. № 1 (3). С. 84–89.

11. Пархоменко В.-П. О., Лавренюк О. І., Михалічко Б. М. Визначення групи горючості епоксіамінних композицій, модифікованих солями купруму(II). *Проблеми пожежної безпеки*. 2017. Вип. 41. С. 124–128.

12. Попов Ю. В., Григоренко А. Н., Пономарев В. А. Вплив металовмісних добавок на механізми зниження димоутворення епоксиполімерних композицій *Проблеми пожежної безпеки*. 2012. Вип. 31. С. 155–159.

References

1. Dasari, A., Yu, Zh. -Zh., Ca, i G.-P., & Mai Y.-W. (2013). Recent developments in the fire retardancy of polymeric materials. *Progress in Polymer Science*. Vol. 38(9). P. 1357–1387. [in English].

2. Lavrenyuk, O.I. (2013). Component composition and toxicity of products of thermo-oxidative destruction of epoxy polymers [Component composition and toxicity of products of thermo-oxidative destruction of epoxy polymers]. *Bulletin of Lviv State University of Life Safety*. No 7. P. 189–193. [in Ukrainian].

3. Zhi, M., Yang, X., Fan, R., Yue, Sh., Zheng, L., Liu, Q., & He, Yu. (2022). A comprehensive review of reactive flame-retardant epoxy resin: fundamentals, recent developments, and perspectives. *Polymer Degradation and Stability*. Vol. 201. P. 109976. [in English].

4. Kandola, B. K., Magnoni, F., & Ebdon, J. R. (2022). Flame retardants for epoxy resins: Applica-

tion-related challenges and solutions. *Journal of Vinyl and Additive Technology*. Vol. 8. Issue1. P. 17–49. [in English].

5. Chai, G., Zhu, G., Gao, S., Zhou, J., Gao, Y., & Wang, Y. (2019). On improving flame retardant and smoke suppression efficiency of epoxy resin doped with aluminum tri-hydroxide. *Advanced Composites Letters*. Vol. 28. P. 1–12. [in English].

6. Longzhen, Q., Jianping, L., Rongcai, X., & Baojun, Q. (2016). Structural Characteristics and Flame-Retardant properties of nanosized magnesium Hydroxide. *Journal of Semiconductors*. Vol. 24. P. 81–83. [in English].

7. Chen, M.-J., Lin, Y.-C., Wang, X.-N., Zhong, L., Li, Q.-L., & Liu, Z.-G. (2015). Influence of Cuprous Oxide on Enhancing the Flame Retardancy and Smoke Suppression of Epoxy Resins Containing Microencapsulated Ammonium Polyphosphate. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. Vol. 54 (51). P. 12705–12713. [in English].

8. Lavrenyuk, H., Mykhalichko, B., Garanyuk, P., & Mykhalichko, O. (2020). New copper(II)-coordinated epoxy-amine polymers with flame-self-extinguishment properties: Elaboration, combustibility testing, and flame propagation rate measuring. *Fire and Materials*. Vol. 44 (6). P. 825–834. [in English].

9. Lavrenyuk, H., & Mykhalichko, B. (2019). Principles of controlled effects on performance properties of self-extinguishing epoxy-amine composites modified by copper(II) carbonate. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. Vol. 5 (126). P. 58–64. [in English].

10. Parkhomenko, V.-P. O., Lavrenyuk, O. I., & Mykhalichko, B. M. (2017). The role of flame retardant-hardener in the formation of self-extinguishing epoxyamine compositions [The role of flame retardant-hardener in the formation of self-extinguishing epoxy-amine compositions]. *Scientific Bulletin: Civil protection and fire safety*. № 1 (3). P. 84–89. [in Ukrainian].

11. Parkhomenko, V.-P. O., Lavrenyuk, O. I., & Mykhalichko, B. M. (2017). Vyznachennia hrupy horiuchosti epoksiaminnykh kompozytsii, modyfikovanykh soliamy kuprumu(II). [Determination of the combustibility group of epoxy-amine compositions modified with copper(II) salts]. *Fire Safety Problems*. Issue 41. P. 124–128. [in Ukrainian].

12. Popov, Yu. V., Grygorenko, A. N., & Ponomarev, V. A. (2012). Vplyv metalovmisnykh dobavok na mekhanizmy znyzhennia dymoutvorennia epoksy-polimernykh kompozytsii [Influence of metal-containing additives on the mechanisms of smoke reduction of epoxy-polymeric compositions]. *Fire Safety Problems*. Issue 31. P. 155–159. [in Ukrainian].

© П. В. Пастухов, О. І. Лавренюк, Б. М. Михалічко, 2024.

Науково-методична стаття.

Надійшла до редакції 07.10.2024.

Прийнято до публікації 18.12.2024.

DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.45.2024.09>*Д. В. Середя, Я. В. Балло**Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, м. Київ, Україна*ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9645-5864> – Д. В. Середя<https://orcid.org/0000-0002-9044-1293> – Я. В. Балло✉ seredadmitriy2019@gmail.com

УДОСКОНАЛЕННЯ РОЗРАХУНКОВОГО МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ПРОТИПОЖЕЖНИХ ВІДСТАНЕЙ ДЛЯ ВІТРОВИХ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК

Чинні будівельні норми визначають вимоги щодо мінімальних протипожежних відстаней між будівлями та спорудами, ураховуючи відстань між зовнішніми стінами й іншими суміжними конструкціями. Для зовнішніх енергетичних установок, таких як вітрові електроустановки, ці вимоги встановлені частково в галузевих нормах, проте більшою мірою вони спрямовані на дотримання санітарних вимог. Наприклад, вони мають бути розташовані не менше ніж за 1 км від житлових будинків і на відстані не менше трьох діаметрів лопатей ротора від сусідніх об'єктів. Однак чинні норми неповністю враховують потенційні ризики виникнення й розвитку пожеж на вітрових електроустановках, особливо у випадку руйнування їх конструкції. Таким чином, постає завдання щодо необхідності вдосконалити методіку визначення протипожежних відстаней, ураховуючи конструктивні параметри вітрових електроустановок і можливі сценарії розвитку пожежі.

Мета статті полягає у визначенні шляхів удосконалення методу встановлення протипожежних відстаней від вітрових електроустановок до суміжних об'єктів з урахуванням їх потенційних небезпек, пов'язаних із пожежею.

У роботі використано методи узагальнення попередніх досліджень щодо аналізу методіки визначення протипожежних відстаней між об'єктами, метод аналітичного дослідження, а також методи порівняння й аналогії.

Проаналізовано потенційні пожежонебезпечні й аварійні ситуації, що супроводжуються руйнуванням вітрових електростанцій; з'ясовано чинники, які впливають на точність визначення протипожежних відстаней залежно від типів (потужності) вітрових електростанцій; досліджено методологію визначення безпечних протипожежних відстаней і виявлено шляхи її вдосконалення; визначено критерії, які можуть характеризувати умови дотримання пожежної безпеки в частині протипожежних відстаней.

Отже, визначено найбільш несприятливі умови поширення пожежі на суміжні об'єкти від вітрових електроустановок, які полягають у можливості механічного руйнування таких електроустановок, що, як наслідок, може призвести до зменшення встановлених протипожежних відстаней і поширення пожежі на суміжний об'єкт. Систематизовано технічні параметри вітрових електроустановок з урахуванням залежностей щодо пропорційного збільшення їх висоти, потужності й кількості пожежного навантаження всередині їх корпусу, що може суттєво впливати на точність визначення протипожежних відстаней. Запропоновано для збільшення точності прогнозування обмеження поширення пожежі між суміжними об'єктами в разі виникнення аварійних ситуацій, спричинених механічним пошкодженням вітрових електроустановок, що супроводжується виникненням пожежі, урахувати значення висоти опори вітрової електроустановки, площі розливу оливи, що утворюється внаслідок руйнації оливонаповнених вузлів та агрегатів.

Ключові слова: вітрова електроустановка, протипожежні відстані, пожежна безпека, обмеження поширення пожежі, аварійні сценарії пожежі.

IMPROVEMENT OF THE CALCULATION METHOD FOR DETERMINING FIRE DISTANCES FOR WIND POWER PLANTS

Existing building regulations determine the requirements for minimum fire distances between buildings and structures, taking into account the distance between external walls and other adjacent structures. For external energy installations, such as wind turbines, these requirements are set partly in industry regulations, but to a greater extent they are aimed at compliance with sanitary requirements. For example, they should be located at least 1 km from residential buildings and at a distance of at least three diameters of the rotor blades from neighboring objects. However, the existing regulations do not fully take into account the potential risks of the occurrence and development of fires at wind power plants, especially in case of destruction of their structure. Thus, there is a task regarding the need to improve the method of determining fire protection distances, taking into account the design parameters of wind power plants and possible fire development scenarios.

The purpose of the work is to determine ways to improve the method of establishing fire-fighting distances from wind turbines to adjacent objects, taking into account their potential fire hazards.

The work used the methods of generalization of previous studies on the analysis of the method of determining fire protection distances between objects, the method of analytical research, as well as the methods of comparison and analogy.

An analysis of potential fire-hazardous and emergency situations accompanied by the destruction of wind power plants was carried out; the factors affecting the accuracy of determining fire protection distances depending on the types (power) of wind power plants are determined; the methodology of determining safe fire distances was investigated and ways of its improvement were identified; criteria are defined that can characterize the conditions of compliance with fire safety in terms of fire protection distances.

The most unfavorable conditions for the spread of fire to adjacent objects from wind power plants have been determined, which consist in the possibility of mechanical destruction of such power plants, which, as a result, can lead to a decrease in the established fire protection distances and cause the fire to spread to the adjacent object. The technical parameters of wind power plants are systematized, taking into account the dependence on the proportional increase in their height, power and the amount of fire load in the middle of their housing, which can significantly affect the accuracy of determining fire protection distances. It is proposed to increase the accuracy of forecasting the limitation of the spread of fire between adjacent objects in the event of emergency situations caused by mechanical damage to wind power installations, which is accompanied by the occurrence of fire, to take into account the value of the height of the support of the wind power installation, the area of oil spillage, which is formed as a result of the destruction of oil-filled assemblies and units.

Key words: wind power plant, fire distances, fire safety, fire spread limitation, fire emergency scenarios.

Постановка проблеми. Вітрова енергетика є одним і найперспективніших джерел відновлюваної енергії, що є результатом удосконалення сучасних технологій і засобів їх реалізації [1]. Частка відновлюваних джерел енергії в усьому світі швидко зростає, для вітрової енергетики нині становить 3,86%. За даними з відкритих джерел Національної енергетичної компанії «Укренерго», реальна функціонуюча потужність вітрової енергетичного сектору в Україні станом на 2022 рік становить 1529 МВт [2], що фактично перекидає потужність одного ядерного реактора атомної електростанції.

Сьогодні в Україні вимоги щодо мінімальних протипожежних відстаней між будівлями та спорудами визначаються відповідно до будівельних норм [3]. Згідно з вимогами цих норм, протипожежні відстані між будинками й спорудами визначаються з урахуванням відстані між зовнішніми стінами або іншими зовнішніми

огорожувальними конструкціями, зокрема виступаючими елементами даху. Визначення й дотримання протипожежних вимог у частині протипожежних відстаней між будинками або зовнішніми установками є передумовою для забезпечення обмеження поширення пожежі між об'єктами різного функціонального призначення.

Якщо для будівель і споруд із визначеним ступенем вогнестійкості встановлено нормовані значення протипожежних відстаней [3], то для зовнішніх установок, до яких належать вітрові електроустановки, вони визначені лише частково й установлені в галузевих нормах. Наприклад, у документі [4] визначені вимоги до протипожежних відстаней в електроустановках, зокрема відстаней від кабельних мереж та електророзподільних мереж до будинків і споруд тощо. У праці [5] зазначається, що влаштовувати вітрові електроустановки допускається на відстані не менше ніж 1 км від населеного пункту (житлових будинків),

при цьому попередньо здійснивши розрахунок потенційного рівня шуму. Окрім цього, вимоги [5] зазначають, що розміщувати вітрові електроустановки варто на відстані до суміжних об'єктів, що не менше ніж три діаметри лопатей ротору.

Разом із тим, незважаючи на наявність певної нормативної бази й методики визначення мінімально необхідних протипожежних відстаней, варто зауважити, що вони неповною мірою враховують потенційні ризики виникнення та розвитку пожежі, зокрема, на вітрових електроустановках. Чинні підходи визначення протипожежних відстаней не враховують можливості аварійного сценарію, що супроводжується руйнуванням конструкції споруди, зокрема для вітрових електроустановок, який полягає в можливості руйнуванні їх вежі за сценарієм «руйнування-пожежа» або «пожежа-руйнування». Таким чином, постає завдання розглянути шляхи вдосконалення розрахункового методу визначення протипожежних відстаней з урахуванням конструктивних параметрів вітрових електроустановок при найбільш несприятливих сценаріях розвитку пожежі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У будівельних нормах [6], а також наукових дослідженнях [7; 8] зазначається, коли мінімальні протипожежні відстані не встановлені нормативними документами, то допускається їх визначати за допомогою розрахункових або експериментальних методів.

Для встановлення мінімальних протипожежних відстаней між об'єктами національним стандартом [9] передбачено використовувати такі методологічні підходи визначення безпечних протипожежних відстаней:

- розрахунково-табличний метод визначення протипожежних відстаней;
- спрощений розрахунковий метод визначення протипожежних відстаней;
- розрахунковий метод визначення протипожежних відстаней із використанням рівняння променистого теплообміну й рівняння нестационарної теплопровідності;
- розрахунковий метод визначення протипожежних відстаней із використанням польових моделей.

Під час визначення протипожежної відстані з використанням розрахунково-табличного методу для об'єкта, у якому виникає пожежа, необхідно визначити величину пожежного навантаження всередині об'єкта, коефіцієнт площі прорізів і тривалість теплового опромінювання. У цьому разі тривалість теплового випромінювання може бути однаковою для різних об'єктів функціонального призначення, дорівнювати часу прибуття

й розгортання пожежно-рятувальних підрозділів. Разом із тим цей методологічний підхід не може охопити випадки, коли в конструкції вітрових електростанцій відсутні світлові прорізи, а основне пожежне навантаження сконцентровано в корпусі силової електрогенерувальної установки, яка знаходиться на певній висоті, що залежить від конструкції несучої опори.

У роботі [10] розглядаються проблемні питання дотримання протипожежних відстаней від вітрових електростанцій до лісових масивів та аналізу наслідків лісових пожеж. Проте ці дослідження не розкривають проблемних питань методики оцінювання безпечних протипожежних відстаней і забезпечення технічного регулювання в цій сфері пожежної безпеки.

У роботі [11] представлено аналіз аварійних ситуацій, причин їх виникнення та наслідків у тому числі в результаті виникнення пожеж на електричних вітроустановках. Важливим аспектом цих досліджень є врахування дистанції, на якій спостерігалось руйнування елементів вітрових установках і їх вплив на суміжні об'єкти. На рисунку 1 подано фото типового випадку пошкодження вітрової електростанції та ситуаційну діаграму аварійних випадків, на якій приведено дистанції розсіювання уламків від вітрових електростанцій унаслідок аварій, які виникали в США за 2008–2018 роки [11].

Аналіз діаграми свідчить, що руйнування та розкидування фрагментів вітрових електростанцій значною мірою залежать від напряму обертання робочих лопатей, при цьому в окремих випадках розкид великих уламків становив до 90 м. Отримані дані дають змогу з більшою точністю прогнозувати ризики аварійних ситуацій, у тому числі пожежонебезпечних сценаріїв.

У роботі [12] розглядалися питання аварійних ситуацій на вітрових електростанціях, які супроводжувалися руйнуванням їх несучої опори, проте не розкриваються питання виникнення й розвитку пожежі внаслідок таких аварій, хоча вони й зафіксовані та спричинили значні збитки для суміжної інфраструктури. На рисунку 2 подано фото цих випадків.

Таким чином, аналіз аварійних ситуацій і попередніх досліджень щодо забезпечення обмеження поширення пожеж між об'єктами свідчить, що чинні методи визначення протипожежних відстаней неповною мірою враховують можливість руйнування об'єкта, що призведе до скорочення початкової протипожежної відстані та подальшого виникнення пожежі гондоли, всередині корпусу якої знаходиться оливонаповнені вузли й агрегати. У цьому випадку важливим чинником

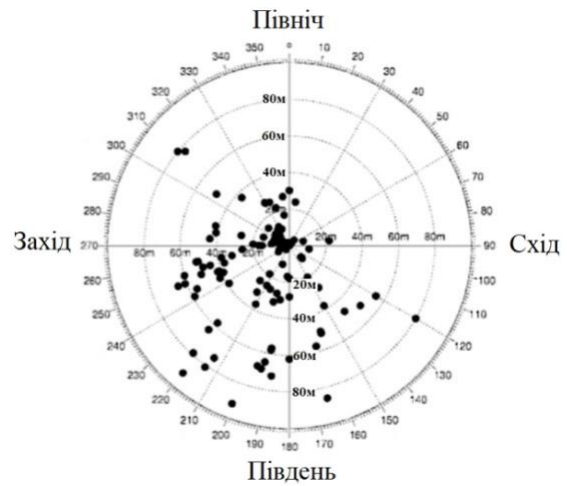


Рис. 1. Фото випадку механічного пошкодження вітрової електроустановки й ситуаційна діаграма дистанції розсіювання їх уламків за 2008–2018 роки



Рис. 2. Фото руйнувань вітрових електроустановок, що супроводжувалися пожежами й пошкодженням прилеглої інфраструктури

є висота башти, на якій встановлено оливонаповнене обладнання й інша горюче навантаження.

Мета статті (постановка завдання) полягає у з'ясуванні шляхів удосконалення методу визначення протипожежних відстаней для вітрових електроустановок з урахуванням їх потенційних небезпек.

Для досягнення поставленої мети варто:

- здійснити аналіз потенційних пожежонебезпечних та аварійних ситуацій, що супроводжуються руйнуванням вітрових електростанцій;
- визначити чинники, які впливають на точність визначення протипожежних відстаней залежно від типів (потужності) вітрових електроустановок;
- дослідити методологію визначення безпечних протипожежних відстаней і виявити шляхи її вдосконалення;
- визначити критерії, які можуть характеризувати дотримання умов безпеки в частині протипожежних відстаней.

Методи дослідження. У роботі використано методи узагальнення раніше виконаних досліджень щодо аналізу методики визначення протипожежних відстаней між об'єктами, метод аналітичного дослідження, методи порівняння й аналогії.

Виклад основного матеріалу. Для створення безпечних умов експлуатації вітрових електроустановок, забезпечення їх цілісності й дотримання вимог техніки безпеки при їх обслуговуванні передбачаються заходи із забезпечення дотримання мінімальних протипожежних і технологічних відстаней до промислових об'єктів, трубопроводів, доріг, об'єктів міської інфраструктури тощо. Протипожежна відстань визначається як числове значення довжини прямого відрізка між об'єктами, при якому ризик поширення пожежі з одного об'єкта на інший стає прийнятним до моменту надходження засобів для ліквідації пожежі й захисту суміжних об'єктів.

Наприклад, у 2014 році законодавством Баварії [13] урегульовано питання визначення мінімальної протипожежної відстані від населеного пункту до вітрової електроустановки. Ця відстань повинна бути не менше ніж у 10 разів більшою за висоту вітрової електроустановки. Ця вимога передусім забезпечувала безпеку людей у разі виникнення механічної аварії на вітровій електроустановці, а саме: у випадку відриву частин лопатей у процесі роботи вітрової електроустановки їх частини могли відлітати на відстань, що перевищує в 10 разів висоту вітрової електроустановки. Наприклад,

від вітрової електроустановки висотою 125 м, за принципом балістики, лопать могла відлітати на відстань близько 1300 м від вітрової електроустановки, що наведено на схемі рисунку 3 [14; 15].

Варто відзначити, що цей сценарій аварій і руйнування вітрової електростанції справедливий лише для механічного руйнування (пошкодження) конструкції лопатей і пов'язаний із їх кінетичною енергією обертального руху й ефекту відскоку від землі. Разом із тим можливий сценарій пожежі всередині корпусу гондоли з подальшим її руйнуванням і динамічним відокремленням окремих горючих елементів, які можуть поширити пожежу на суміжні об'єкти.

Також серед можливих сценаріїв поширення пожежі на суміжні об'єкти варто розглянути випадки падіння вежі й пошкодження корпусу гондоли з подальшим розливом оливи. При цьому варто розуміти, що вітрові електроустановки можуть містити до 3 000 л пожежонебезпечних мастильних матеріалів, що використовується для змащення й охолодження механізмів електрогенерації. Відповідно до праць [16; 17], ця технічна олива є горючою рідиною, у разі виникнення несправностей на вітрових електроустановках вона, маючи значне пожежне навантаження, може призвести до пожежі значної площі й, відповідно, сприяти її розвитку та поширенню на суміжні наземні об'єкти інфраструктури.

Окрім ефекту падіння несучої опори, висота якої впливає на скорочення значення довжини дистанції протипожежної відстані, варто врахувати ефект утворення «кратера» від значної ваги гондоли, у корпусі якої знаходиться олива. Цей ефект «кратера» може мати позитивний і негативний вплив на процес поширення пожежі.

Серед позитивних чинників можливого ефекту утворення «кратера» є утворення штучного земляного бар'єру, який локалізує розтікання оливи з гондоли в межах місця її падіння. Негативним явищем ефекту «кратера» є можливість пошкодження підземних комунікацій, зокрема нафтогазопроводів та аналогічних об'єктів критичної енергетичної інфраструктури, які можуть знаходитися в зоні розміщення вітрової електростанції.

З точки зору найгіршого сценарію пожежі, яка супроводжується руйнуванням вежі вітрової електростанції, є руйнування основи та пряме падіння опори вежі в бік суміжного об'єкта, при цьому корпус гондоли розламується при падінні на землю, а мастило розтікається та загоряється. На рисунку 4 подано фото аварії вітрової електростанції висотою 48 м при руйнуванні основи несучої опори вежі.

Таким чином, під час перегляду методу визначення безпечних протипожежних відстаней серед найбільш пожежонебезпечних сценаріїв аварії на вітрових електростанціях можливо відзначити такі випадки:

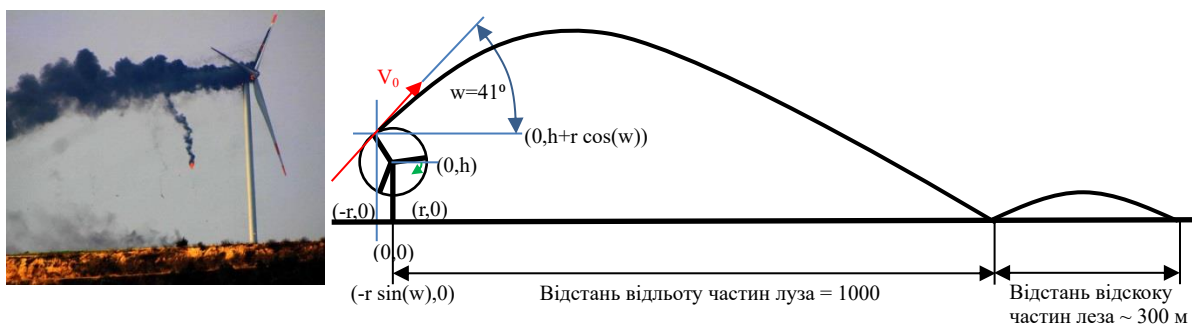


Рис. 3. Схема можливого руйнування й відльоту механічних частин механізму вітрової електроустановки



Рис. 4. Фото падіння вітрової електроустановки через руйнування основи у 2019 році, США

– загоряння й падіння окремих елементів вітрової електростанції в зону розміщення суміжних об'єктів;

– падіння вежі в зону розміщення суміжних об'єктів (часткове чи повне) та подальше займання оливи, що розтікається через механічне пошкодження корпусу гондоли.

Окрім цього, варто враховувати, що висота вежі, діаметр ротора та кількість оливи в механізмах вітрогенерувального обладнання є взаємопов'язаними чинниками, а саме: чим вища вежа, тим більша кількість оливи, відповідно, і пожежного навантаження знаходиться в корпусі установки. У таблиці 1 наведено дані щодо кількості оливи в корпусі гондоли залежно від висоти та потужності вітрової електростанції [18; 19].

Також під час удосконалення методики визначення протипожежних відстаней та обґрунтування небезпечних сценаріїв виникнення пожежі варто враховувати військові загрози, зумовлені умовами сьогодення. Наприклад, 8 січня 2024 року в Білгород-Дністровському районі Одеської області на Дністровській вітровій електростанції компанії Elementum Energy внаслідок влучання ударного безпілотного літального апарата рф у вежу

вітрової електроустановки відбулося її падіння [20]. На рисунку 5 подано фото цієї аварії.

Визначення безпечних протипожежних відстаней із використанням розрахункових методів здійснюється за допомогою процесів теплообміну. Питання взаємозв'язків і впливу теплового потоку від пожежі на суміжні об'єкти досліджувала низка вчених, однак їхні дослідження неповною мірою охоплюють питання визначення протипожежних відстаней для вітрових електроустановок.

Для визначення протипожежної відстані за спрощеним методом установлюють тепловий баланс поверхні об'єкта, що сприймає тепло від вогнища пожежі, за певної відстані, коли температура такої поверхні не перевищує допустимої температури. У цьому разі враховують утрати тепла через необігрівну поверхню. Суть цього методу полягає в розв'язанні рівняння теплового балансу, яке найзручніше розв'язати шляхом побудови графіка функції. Мінімальною протипожежною відстанню буде найближче більше ціле значення до точки перетину відповідною кривою осі абсцис. Проте цей метод не завжди застосовний для вітрових електроустановок через їхню специфіку конструкції та аварійних сценаріїв, які описано вище.

Таблиця 1

Дані щодо кількості мастила в корпусі вітрової електроустановці залежно від її висоти

№ з/п	Потужність вітрової електроустановки	Висота башти	Діаметр ротора	Кількість оливи в об'ємі механічної частини ротора
1	30 кВт	18 м	10 м	12 л (±2)
2	75 кВт	22 м	17 м	30 л (±4)
3	100 кВт	24 м	20 м	40 л (±5)
4	200 кВт	30–38 м	25 м	80 л (±12)
5	500 кВт	40–53 м	39 м	200 л (±25)
6	900 кВт	61–73 м	52,2 м	360 л (±40)
7	1,8 МВт	60–78 м	80 м	720 л (±60)
8	3 МВт	80–90 м	90 м	1200 л (±90)
9	3 МВт	84–119 м	112 м	1200 л (±90)
10	4,2 МВт	84–92 м	117 м	1680 л (±100)
11	6,8 МВт	119–169 м	162 м	2720 л (±170)
12	9,5 МВт	Індивідуально	164 м	3800 л (±200)



Рис. 5. Падіння вітрової електроустановки внаслідок удару військового безпілотного літаючого апарату

Розроблена методика [21] дослідження впливу густини теплового потоку на елементи суміжних будівельних об'єктів описує залежність тривалості теплового впливу на протипожежну відстань між об'єктами. Сутність цієї методики визначення протипожежної відстані між об'єктами за критерієм теплового потоку полягає у визначенні його величини на поверхні суміжного будівельного об'єкта, що опромінюється від пожежі об'єкта, що горить (рисунок 6).

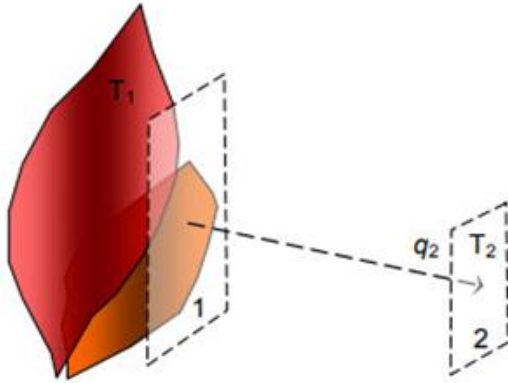


Рис. 6. Схема опромінення тіла 2 факелом, де 1 – зведена до прямокутника поверхня факела полум'я, 2 – зведена до прямокутника поверхня тіла, що опромінюється

Сьогодні під час з'ясування протипожежних відстаней від вітрових електроустановок до суміжних об'єктів за допомогою [9] більшою мірою можливо застосовувати розрахунковий метод визначення протипожежних відстаней із використанням рівняння променистого теплообміну й рівняння нестационарної теплопровідності, а також метод визначення протипожежних відстаней із використанням польових моделей.

Розрахунковий метод оцінювання протипожежних відстаней із використанням рівняння променистого теплообміну й рівняння нестационарної теплопровідності дає змогу визначити розрахункову температуру на поверхні суміжного об'єкта, що опромінюється теплом (T_p), за рівнянням теплопередачі, яке ґрунтується на використанні рівняння нестационарної теплопровідності, що має вигляд [22]:

$$c_p \rho \frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T_p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T_p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T_p}{\partial z} \right), \quad (1)$$

де T – тривалість теплового опромінювання, с;
 λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу або речовини в будинку, що сприймає тепло від пожежі в суміжному об'єкті будівництва, Вт/(м·°C);

c_p – питома теплоємність матеріалу або речовини в будинку, що сприймає тепло від пожежі в суміжному об'єкті будівництва, Дж/(кг·°C);

ρ – густина матеріалу або речовини в будинку, що сприймає тепло від пожежі суміжного об'єкта будівництва, кг/м³.

При цьому променистий теплообмін між факелом пожежі та поверхнею фасаду суміжного об'єкта розраховують шляхом розв'язання інтегрального рівняння, яке має такий вигляд [22]:

$$\sum_{j=1}^N (\delta_{ij} - \varphi_{ij}) \sigma \theta_j^4 = \sum_{j=1}^N \frac{1}{A_j} \left(\frac{\delta_{ij}}{\varepsilon_j} - \varphi_{ij} \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_j} \right) q_j, \quad (2)$$

де δ_{ij} – коефіцієнт, що дорівнює 1 при $i = j$ та 0 в інших випадках;

i, j – кількість елементів, на які розбивається поверхня, що випромінює тепло й опромінюється теплом відповідно;

q_j – кількість теплоти, що передається від i поверхні до j поверхні;

$\varphi_{i,j}$ – променевий кутовий коефіцієнт опромінювання, що залежить від взаємного розташування i та j поверхонь.

Значення променевого кутового коефіцієнта опромінювання $\varphi_{i,j}$ визначають так [22]:

$$\varphi_{ij} = \frac{1}{A_i} \iint_{A_i A_j} \frac{\cos \beta_i \cos \beta_j}{\pi r^2} dA_j dA_i, \quad (3)$$

де β – кут між нормаллю до елемента й лінією, яка з'єднує елементи i та j ;

r – відстань між центрами елементів i та j , м;

A_i, A_j – площа елементів поверхонь, що випромінюють тепло й опромінюються теплом відповідно, м².

Таким чином, одним із ключових параметрів, який може вплинути на розрахунок значення протипожежної відстані, є « r » – відстань між центрами елементів « i » та « j ». Якщо для будівель і споруд ця відстань визначається між границями поверхонь, які сприймають тепловий вплив, то для вітрової електроустановки ця протипожежна відстань може змінюватися через такі чинники:

– пошкодження та, як наслідок, падіння гондоли, усередині корпусу якої знаходиться оливонаповнені вузли й агрегати. У даному випадку важливим чинником є висота башти, на якій встановлено оливонаповнене обладнання;

– об'єм (кількість) оливи в агрегатах вітрової електроустановки, яке при пошкодженні корпусу гондоли внаслідок удару вільно розтікається по поверхні землі, тим самим збільшуючи площу потенційної пожежі класу В.

Більшість пожеж вітрових електроустановок виникають усередині гондоли, на її корпусі або на поверхні лопатей, тобто на висоті понад 120 м від поверхні землі. Таким чином, при розрахунку

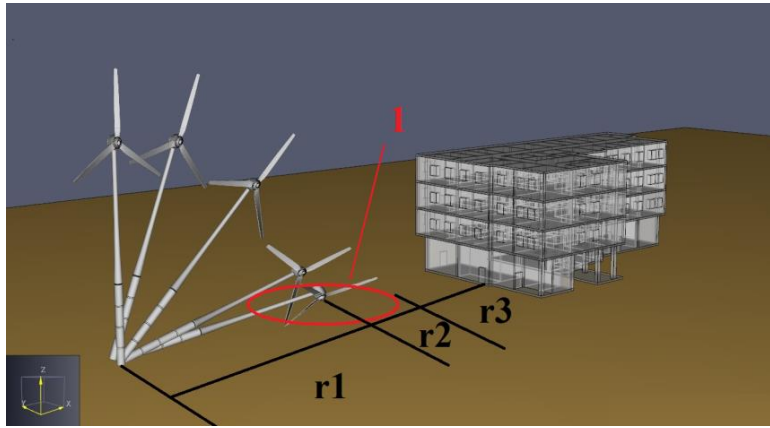


Рис. 7. Схема потенційної аварії та супутніх чинників, які впливають на процес оцінювання протипожежної відстані між вітровою електростанцією й суміжним об'єктом, де r_1 – відстань, яка наближено дорівнює висоті опори вітрової електростанції; r_2 – відстань, яка наближено дорівнює радіусу зони горіння оливи, яка витекла; r_3 – фактична протипожежна відстань від краю зони розливу й горіння оливи до стіни суміжного об'єкта; 1 – потенційна зона розливу оливи з корпусу вітрової електроустановки

протипожежної відстані для вітрових електроустановок із використанням рівняння променистого теплообміну й рівняння нестационарної теплопровідності відстань між центрами елементів, що випромінюють і сприймають тепло, варто враховувати висоту вітрової електроустановки та площу розливу оливи унаслідок руйнації оливонаповнених вузлів та агрегатів. На рисунку 7 наведено візуалізацію уточнювальних коефіцієнтів, які впливають на точність визначення протипожежної відстані від вітрової електроустановки до суміжної будівлі.

Таким чином, удосконалення розрахункового методу визначення протипожежних відстаней для вітрових електроустановок має враховувати не тільки фактичну відстань від зони встановлення вітрової електростанції до суміжного об'єкта, а й потенційні аварійні сценарії, які потребують уточнення параметрів, що впливають на зменшення такої відстані. Такими уточнювальними коефіцієнтами можуть стати коефіцієнти відстані, яка наближено дорівнює висоті опори вітрової електростанції, та, відповідно, відстані, яка наближено дорівнює значенню радіуса в зоні горіння оливи, що може витекти з корпусу гондоли. При цьому значення радіуса прямо пропорційно буде залежати від кількості оливи в корпусі турбіни. У цьому випадку для створення найбільш несприятливих умов можливо знехтувати коефіцієнтами проникнення оливи в ґрунт, а відповідно, не зменшувати її фактичну кількість.

Висновки. На основі проведеного дослідження встановлено, що вітрові електроустановки в разі несправностей можуть призвести до аварійних ситуацій у роботі, включаючи пожежі та їх механічні руйнування. У свою чергу, встановлено численні випадки, коли пожежі від вітрових електроустановок поширюються на лісові

масиви, сільськогосподарські угіддя й суміжні об'єкти інфраструктури.

За результатом аналізу визначено найбільш несприятливі додаткові умови поширення пожежі на суміжні об'єкти від вітрових електроустановок, які полягають у можливості механічного руйнування вітрових електроустановок, що, як наслідок, може призвести до зменшення встановлених протипожежних відстаней і спричинити поширення пожежі на суміжний об'єкт або навіть його руйнування.

Проаналізовано й систематизовано технічні параметри вітрових електроустановок з урахуванням залежностей щодо пропорційного збільшення їх висоти, потужності та кількості пожежного навантаження всередині їх корпусу.

Здійснено аналіз чинної методики визначення протипожежних відстаней і встановлено потенційні шляхи її вдосконалення для збільшення точності прогнозування обмеження поширення пожежі між суміжними об'єктами в разі виникнення аварійних ситуацій, спричинених механічним пошкодженням вітрових електроустановок, що супроводжується виникненням пожежі. Удосконалення чинної методики може бути досягнуто в разі врахування в розрахунках протипожежної відстані з використанням рівняння променистого теплообміну та рівняння нестационарної теплопровідності відстані між центрами елементів, що випромінюють і сприймають тепло, з уточненням значення висоти опори вітрової електроустановки, площі розливу оливи, що утворюється внаслідок руйнації оливонаповнених вузлів та агрегатів.

Таким чином, удосконалення методу визначення протипожежних відстаней з урахуванням особливостей вітрових електроустановок є важливим кроком для підвищення точності прогнозування

поширення пожежі на суміжні об'єкти і створення передумов запобігання розвитку можливих аварій, що супроводжуються пожежами.

Список літератури

1. Lin Y., Tu L., Li, H., Li W. Fault analysis of wind turbines in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. № 55. P. 482–490.

2. Вітрова енергетика в Україні та світі. URL: <https://hmarochos.kiev.ua/2022/01/18/vitrova-energetyka-v-ukrayini-ta-sviti/> (дата звернення: 08.02.2024).

3. Планування та забудова територій. ДБН Б.2.2-12:2019 [Чинний від 2019-10-01]. Київ : Мінрегіон України, 2019. 177 с. (Державні будівельні норми України). С. 114–126.

4. Правила улаштування електроустановок. [Чинні від 2017-08-21]. Київ : Міненерговугілля України, 2017. 614 с. С. 95–375.

5. Правила проектування вітряних електричних станцій ГКД 341.003.001.002-2000 [Чинний від 2000-08-01]. Київ : Мінпалива та енергетики, 2000. 50 с. С. 10–15.

6. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги ДБН В.1.1.7:2016 [Чинний від 2017-06-01]. Київ : Мінрегіон України, 2017. 47 с.

7. Моделювання теплового впливу пожежі через віконний проріз будинку з горючим фасадом на елементи суміжних об'єктів/В.В. Ніжник, Ю.Л. Фещук, С.В. Поздєєв, В.С. Некора. *Problems of Emergency Situations* : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Харків : Національний університет цивільного захисту України, 2021. 382 с. С. 65–66.

8. Ніжник В. В. Підходи щодо визначення протипожежних відстаней між будинками та спорудами. *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*. 2019. № 53. С. 215–226.

9. Пожежна безпека. Визначення протипожежних відстаней між об'єктами розрахунковими методами. Основні положення ДСТУ 9058:2020 [Чинний від 2021-05-01]. Київ : УкрНДНЦ, 2021. 24 с. С. 10–11.

10. Butler B. W., Webb J., Hogge J., Wallace T. Vegetation clearance distances to prevent wildland fire caused damage to telecommunication and power transmission infrastructure. *Fires Conference*. 2014. May. 257 p. P. 35–40.

11. SAFETY OF WIND SYSTEMS, URL: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://windfarmaction.wordpress.com/wp-content/uploads/2011/10/safety-of-wind-systems.pdf](https://windfarmaction.wordpress.com/wp-content/uploads/2011/10/safety-of-wind-systems.pdf) (дата звернення: 08.02.2024).

12. Mou J., Jia X., Chen P., Chen L. Research on operation safety of offshore wind farms. *Journal of marine science and engineering*. 2021. № 9 (8). P. 881. P. 2–32.

13. Law to change the Bavarian building regulations and the law on official organization construction,

housing and water management *Bavarian Law and Ordinance Gazette*. 2014. URL: <https://www.verkuendung-bayern.de/gvbl/2014-478> (дата звернення: 08.02.2024).

14. Setback distance between wind turbines and dwellings: the new 10H rule protects residents in Bavaria. URL: <http://en.friends-against-wind.org/realities/10h-regel> (дата звернення: 08.02.2024).

15. PUBLIC SAFETY OF INDUSTRIAL WIND POWER PLANTS. URL: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://en.friends-against-wind.org/doc/Dossier-Risques-eoliens.pdf> (дата звернення: 08.02.2024).

16. Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація ДСТУ 8829:2019 [Чинний від 2020-01-01]. Київ : УкрНДНЦ, 2020. 78 с. С. 8–9.

17. Климась Р. В. Удосконалення методу прогнозування припинення та поширення горіння системою вогнеперешкодження на маслонаповнених трансформаторних підстанціях : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 21.06.02 / Львів. держ. ун-т безпеки життєдіяльності. Львів, 2022. 25 с. С. 5–6.

18. Gear Oil Wind Turbine, Vestas V52-850 kW, Gearbox Upgrade. URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://iqoil.co.za/wp-content/uploads/2020/05/WIND_G1-1.pdf (дата звернення: 08.02.2024).

19. Hydraulic Oil Wind Turbine, Vestas V90-2MW, Pitch Hydraulic System. URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://iqoil.co.za/wp-content/uploads/2020/05/Wind_Hydraulic-Oil-Wind-Turbine-Vestas-V90-2MW-Pitch-Hydraulic-System_OXHULT_ASWI9007-UK.pdf (дата звернення: 08.02.2024).

20. На Одещині через атаку безпілотною впала вітрова турбіна, російські загарбники пошкодили вже 11 таких. URL: <https://inshe.tv/important/2024-01-09/820297/> (дата звернення: 09.01.2024).

21. Оцінювання небезпеки поширення пожежі на суміжні будівельні об'єкти за критерієм теплового потоку / В. В. Ніжник, С. В. Поздєєв, С. В. Жартовський, Ю. Л. Фещук. *Міжнародний науковий журнал: Інтернаука*. 2019. № 73. С. 47–51.

22. Ніжник В. В. Розвиток наукових основ оцінювання небезпеки поширення пожежі на суміжні будівельні об'єкти : дис. ... докт. техн. наук : 21.06.02. Харків, 2020. 409 с. С. 347–349.

References

1. Lin, Y., Tu, L., Liu, H., & Li, W. (2016). Fault analysis of wind turbines in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 482–490 [in English].

2. Vitrova enerhetyka v Ukraini ta sviti [Wind energy in Ukraine and the world]. (2022). Retrieved from <https://hmarochos.kiev.ua/2022/01/18/vitrova-energetyka-v-ukrayini-ta-sviti/> [in Ukrainian].

3. *Planuvannya ta zabudova teritorij* [Planning and development of territories]. (2019). DBN

V.2.2-12:2019 from 1st October 2019. Kyiv: Minregion Ukrainy [in Ukrainian].

4. *Pravila ulashtuvannya elektroustanovok*. [Rules for arranging electrical installations]. (2017). PUE from 21st August 2017. Kyiv: Minenergouyulya Ukrainy [in Ukrainian].

5. *Pravila proektuvannya vitryanih elektrichnih stancij* [Design rules of wind power plants]. (2000). GKD 341.003.001.002-2000 from 1st August 2000. Kyiv: Minpaliva ta energetiki [in Ukrainian].

6. *Pozhezhna bezpeka ob'ektiv budivnictva. Zagalni vimogi* [Fire safety of construction sites. general requirements]. (2017). DNB V.1.1.7:2016 from 1st June 2017. Kyiv: Minregion Ukrainy [in Ukrainian].

7. Nizhnyk, V. V., Feshchuk, Yu. L., Pozdieiev, S. V., & Nekora, V. S. (2019). Modeliuvannya teplovoho vplyvu pozhezhi cherez vikonnyi proriz budynku z horiuchym fasadom na elementy sumizhnykh obektiv. [Modeling the thermal effect of a fire through a window opening of a building with a burning facade on the elements of adjacent objects]. In *Problems of Emergency Situations: Problems of Emergency Situations: materials of the International Scientific and Practical Conference* (pp. 65-66). May 20, 2021 Kharkiv, Ukraine [in Ukrainian].

8. Nizhnyk, V. V. (2019). Pidkhody shchodo vyznachennia protypozhezhnykh vidstanei mizh budynkami ta sporudamy. [Approaches to determining fire safety distances between buildings and structures] *Suchasni problemy arkhitektury ta mistobuduvannia*. 53. 215–226 [in Ukrainian].

9. *Pozhezhna bezpeka. Vyznachennia protypozhezhnykh vidstanej mizh ob'ektami rozrahunkovimi metodami. Osnovni polozhennia* [Fire Security. Determination of fire protection distances between objects by calculation methods. Substantive provisions]. (2020). DSTU 9058:2020 from 1st May 2020. Kyiv: *Derzhstandart Ukraine* [in Ukrainian].

10. Butler, B. W., Webb, J., Hogge, J., & Wallace, T. (2014). Vegetation clearance distances to prevent wildland fire caused damage to telecommunication and power transmission infrastructure. In *Fires Conference* (p. 257) [in English].

11. SAFETY OF WIND SYSTEMS. (2011). Retrived from <https://windfarmaction.wordpress.com/wp-content/uploads/2011/10/safety-of-wind-systems.pdf> [in English].

12. Mou, J., Jia, X., Chen, P., & Chen, L. (2021). Research on operation safety of offshore wind farms. *Journal of marine science and engineering*, 9 (8), 881 [in English].

13. Law to change the Bavarian building regulations and the law on official organization construction, housing and water management *Bavarian Law and Ordinance Gazette*. (2014). Retrived from

<https://www.verkuendung-bayern.de/gvbl/2014-478> [in English].

14. Setback distance between wind turbines and dwellings: the new 10H rule protects residents in Bavaria. (2014). Retrived from <http://en.friends-against-wind.org/realities/10h-regel> [in English].

15. PUBLIC SAFETY OF INDUSTRIAL WIND POWER PLANTS. (2007). Retrived from <http://en.friends-against-wind.org/doc/Dossier-Risques-eoliens.pdf> [in English].

16. *Pozhezhovybukhonebezpechnist rechovyn i materialiv. Nomenklatura pokaznykiv i metody yikhnoho vyznachennia. Klasyfikatsiia* (2019). [Fire and explosion hazard of substances and materials. Nomenclature of indicators and methods of their determination. Classification]. DSTU 8829:2019 from 1st January 2020. Kyiv: *Derzhstandart Ukraine* [in Ukrainian].

17. Klymas, R. V. (2022). Udoskonalennia metodu prohnozuvannia prypynennia ta poshyrennia horinnia systemoiu vohneperezhkodzhannia na maslonapovnenykh transformatornykh pidstantsiakh [Improvement of the method of predicting the cessation and spread of burning by the fire prevention system at oil-filled transformer substations]. Extended abstract of candidate's thesis. Lviv: LSULS [in Ukrainian].

18. Gear Oil Wind Turbine, Vestas V52-850 kW, Gearbox Upgrade. (2014). Retrived from https://iqoil.co.za/wp-content/uploads/2020/05/WIND_G1-1.pdf [in English].

19. Hydraulic Oil Wind Turbine, Vestas V90-2MW, Pitch Hydraulic System. (2014). Retrived from https://iqoil.co.za/wp-content/uploads/2020/05/Wind-Hydraulic-Oil-Wind-Turbine-Vestas-V90-2MW-Pitch-Hydraulic-System_OXHULT_ASWI9007-UK.pdf [in English].

20. Na Odeshchyni cherez ataku bezpilotnyka vpala vitrova turbina, rosiiski zaharbnyky poshkodyly vzhe 11 takykh (2024). [In Odesa, a wind turbine fell due to a drone attack, the Russian invaders have already damaged 11 of them]. Retrived from <https://inshe.tv/important/2024-01-09/820297/> [in Ukrainian].

21. Nizhnyk, V. V., Pozdieiev, S. V., Zhar-tovskiy, S. V., & Feshchuk, Yu. L. (2019). Otsiniuvannia nebezpeky poshyrennia pozhezhi na sumizhni budivelni obiekty za kryteriiem teplovoho potoku [Assessment of the danger of fire spreading to adjacent construction objects based on the heat flow criterion]. *Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal: Internauka. K*, (11), 73 [in Ukrainian].

22. Nizhnik V. V. (2020). Rozvytok naukovykh osnov otsiniuvannia nebezpeky poshyrennia pozhezhi na sumizhni budivelni obiekty [Development of scientific bases for assessing the danger of fire spreading to adjacent construction objects]. Doctor's thesis. Kharkiv [in Ukrainian].

© Д. В. Серета, Я. В. Балло, 2024.

Науково-методична стаття.

Надійшла до редакції 23.09.2024.

Прийнято до публікації 18.12.2024.



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.45.2024.10>

О. С. Черненко, В. В. Калінчак, М. О. Іванов, О. К. Копійка
Одеський національний університет імені І. І. Мечникова,
м. Одеса, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3722-0694> – О. С. Черненко

<https://orcid.org/0000-0002-6030-6007> – В. В. Калінчак

<https://orcid.org/0009-0006-1547-4067> – М. О. Іванов

<https://orcid.org/0000-0001-9802-2256> – О. К. Копійка

✉ teplophys@onu.edu.ua

ОЦІНЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ЗАЙМАННЯ БІНАРНИХ РОЗЧИНІВ

Дослідженню температури займання рідини (fire point) на відміну від температури спалаху (flashpoint) приділяється вкрай мала увага. Одним із підходів, що використовувався для знаходження аналітичної умови при температурі займання, є встановлення відношення між тиском насиченої пари і стехіометричним значенням тиску. Однак автори для різних класів індивідуальних органічних сполук отримували «характерні» значення цього відношення від 0,6 до 1,5. Для бінарних розчинів подібних досліджень не проводилося.

Метою статті є дослідити вплив стехіометричного відношення між парою та киснем і зміни складу бінарних сумішей на їх температуру займання. У роботі запропоновано аналітичні залежності температури займання від складу бінарного розчину, які ґрунтуються на фізико-хімічних властивостях компонентів розчину (теплота пароутворення, її температурна залежність, критична температура й температура кипіння). Розглядаються окремо водні розчини легкозаймистої речовини (ЛЗР) і розчин двох легкозаймистих речовин.

В основі аналітичної формули лежить припущення, що в момент займання рідини біля її поверхні спостерігається стехіометричне співвідношення між парою легколетючої рідини й киснем повітря. Зменшення концентрації пари біля поверхні водного розчину враховується законом Рауля.

При оцінюванні температури займання бінарних розчинів можливі умовно два випадки: температури займання компонентів розчину 1) суттєво відрізняються або 2) близькі. У першому випадку можна припустити, що важколетючий компонент практично не випаровується за наявності більш летючого компонента, тому його можна вважати інертним компонентом. Однак це припущення можливе при частці легколетючого компонента більше ніж 50%. У більш загальному випадку припускається одночасна участь обох пар у займанні краплі й припускається, що стехіометрія спостерігається для кожної пари.

Спостерігається узгодження отриманої залежності з наявними експериментальними даними (методом відкритого тиглю) за водним розчином ацетону, метанолу, етанолу і пропанолів, а також розчинів н-октану/н-декану й етанолу/бутанолу. Це дає змогу стверджувати, що припущення про досягнення стехіометрії для пари кожного компонента суміші є прийнятним.

Ключові слова: температура займання, бінарний розчин, водний розчин, легкозаймиста рідина.

O. S. Chernenko, V. V. Kalinchak, M. O. Ivanov, O. K. Kopyka
Odesa I. I. Mechnikov National University,
Odesa, Ukraine

DETERMINATION OF FIRE POINT BINARY LIQUID SOLUTION

Very little attention is paid to the study of fire point. One approach used to find the analytical condition for fire point is to fit between the saturated vapor pressure and the stoichiometric value of the pressure. However, different authors for different classes of individual organic compounds identified “characteristic” values of this ratio from 0.6 to 1.5. Similar studies were not conducted for binary solutions. The purpose of this work is to

investigate the influence of the stoichiometric ratio between steam and oxygen and changes in the composition of binary mixtures on their fire point. In this work, analytical dependences of fire point binary solution from his properties are proposed, which are based on the physicochemical properties of the solution components (heat of vaporization, its temperature dependence, critical temperature and boiling point). An aqueous solution of a flammable liquid and a solution of two flammable liquids are considered separately.

The basis of the analytical formula is the assumption that at the moment of liquid ignition near its surface, mass fractions vapor of the light summer liquid and the oxygen of the air is stoichiometrically. The decrease in vapor concentration near the surface of an aqueous solution is taken into account by Raoult's law.

When evaluating fire point of binary solutions there are two cases: fire points of the solution components 1) is significantly different or 2) close. In the first case, it can be assumed that a one component difficult evaporates. And therefore it can be called an inert component. However, this assumption is worse when his part is more than 50%. In the more general case, simultaneous participation of both pairs in droplets ignition is assumed and stoichiometry is assumed to be allowed for each vapor.

The agreement of the obtained dependence with the available experimental data on aqueous solutions of acetone, methanol, ethanol, and propanol, as well as solutions of n-octane/n-decane and ethanol/butanol is observed. This allows us to state that the assumption of achieving stoichiometry for a vapor of each mixture component is acceptable.

Key words: fire point, binary solution, aqueous solution, flammable liquid.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Важливими показниками фізико-хімічних властивостей горючих рідких речовин є температури спалаху й займання, незважаючи на те що ці характеристики зазвичай залежать від методики їх визначення [1]. Однак саме ці температури використовують для класифікації рідин на легкозаймисті й горючі [2].

В огляді [1] розглянуто основні моделі оцінювання температури спалаху, які ґрунтуються на температурі кипіння, тиску пару чи молекулярній структурі (дескриптори). Основним підсумком автори вказують, що не існує універсальної моделі для прогнозування температури спалаху індивідуальних горючих сумішей.

Пошук альтернативних палив для економії або заміни традиційних горючих останнім часом привів до активного дослідження займання й горіння сумішей горючих речовин, у тому числі й із додаванням води, наприклад, у вигляді емульсій чи пін [3; 4], температури спалаху бінарних сумішей горючих речовин [5; 6] чи їх водних розчинів [7]. Пошук нових підходів не зупиняється [8; 9].

Якщо кількість різноманітних досліджень температури спалаху (flashpoint) дуже велика, то температурі займання (fire point) приділяється суттєво менше уваги [10]. Це можна пояснити, на нашу думку, тим, що пожежна безпека виникає вже при температурі спалаху. Крім того, прийнято вважати, що температура займання перевищує температуру спалаху на 1–5 °С для легкозаймистих і на 30–35 °С для горючих рідин.

Одним із цікавих методів, що застосовується для оцінювання температури займання (firepoint), є модель Джонса [11]. У роботі на прикладі чотирьох органічних сполук (м-ксилолу, н-бутанолу, н-декану й н-додекану) температура займання розраховують за принципом, що температура

займання виникає, коли тиск пари перевищує стехіометричне значення (з киснем біля поверхні рідини відповідно до хімічної реакції) в 1,5 раза: $p_s/p_{st} = 1,5$. У роботі Роберта й Вайнса [12], на яку й посилається Джонс, для невеликого ряду органічних сполук указані коефіцієнти p_s/p_{st} від 1,33 до 1,92.

Посилаючись на модель Джонса, у роботах [13; 14] на основі власних експериментів і розрахунків також зроблені оцінки. Так, для температури займання органічних кислот (оцтова, н-пропіонова, н-масляна, мурашина) [13] встановлено середнє значення $p_s/p_{st} = 1,11$. Для гомологічного ряду насичених одноатомних спиртів (від метанолу до октанолу) [14] отримано середнє значення $p_s/p_{st} = 0,78$, причому відношення тисків по мірі збільшення кількості атомів збільшувалося більш/менш монотонно від 0,56 до 1,08. Автори вважали, що значення температури спалаху у відкритому тиглі практично збігалися з температурою займання спиртів.

Отже, одностайної думки про значення тиску насиченого пару при температурі займання немає. Цю відмінність можна пояснити різними методами експериментального визначення температури займання індивідуальних рідин.

При визначенні температури спалаху також існують підходи, в основі яких лежить стехіометрія між компонентами в реакції горіння. Так, існує правило Лесли-Дженіза (Leslie-Geniesse Rule) [15] для відношення тиску насиченого пару рідини до атмосферного тиску: $p_s/p_0 = 1/8\beta$, де β – стехіометричний коефіцієнт у реакції горіння. Це правило виявилось надзвичайно точним при прогнозуванні значень температури спалаху 1062 хімічних речовин.

Варто навести відоме правило Ллойда (the Lloyd's Rule) [16; 17] для визначення температури

спалаху, згідно з яким об'ємна концентрація парів при температурі спалаху становить $C_f \approx 0,55C_{st}$, що лягло в основу «напівстехіометричного правила» $C_f \approx 0,5C_{st}$. Тут C_{st} – стехіометрична концентрація пари.

Це правило з достатньою точністю прогнозує температуру спалаху для великого кола органічних сполук. Винятками є, наприклад, диметилловий ефір, гліцерин, бензойна та мурашина кислоти.

У роботі [18] запропоновано спосіб оцінювання температури займання рідини. Температура запалювання в разі виконання умови самоприскорення (велике значення добутку теплоти горіння на енергію активації) передусім визначається встановленням стехіометричних концентрацій кисню й горючих газів у газовій фазі $Y_{fs} / Y_{O_2s} = \mu_f / \nu \mu_{O_2} \Big|_{cmex}$ поблизу поверхні краплі, які знаходяться з хімічних рівнянь горіння.

Доволі точно визначити температуру займання індивідуальної речовини T_{fire} (в К) дає змогу й відома формула Блинова [19]: $T_{fire} = \frac{A}{D_{f0} \beta p_s}$, де D_{f0} – коефіцієнт дифузії пари рідини при н.у. в м²/с, $A = 45,3 \text{ К} \cdot \text{Па} \cdot \text{м}^2/\text{с}$ (для органічних сполук).

Для суміші рідин оцінити температуру спалаху чи займання ще складніше, оскільки склад суміші парів над поверхнею рідини змінюється залежно від температури рідини. Для багатокомпонентних рідких сумішей, коли один із компонентів більш летючий, часто припускають, що, наприклад, температура спалаху визначається лише дуже малою концентрацією розчиненого легколеткого компонента. У роботі [20] була спроба теоретично передбачити температуру спалаху й займання рідкої паливної суміші на прикладі н-октану і н-декану, у якій кожен компонент має різну летючість. Припускалося, що рідка суміш є ідеальним розчином, тоді можна застосувати закон Рауля. Загальний рівноважний тиск пари рідкої суміші є сумою парціальних тисків компонентів розчину. Однак умови займання суміші не наводилися.

Таким чином, дослідження займання й горіння бінарних і мультикомпонентних сумішей рідких палив різного складу (емульсії, паливні суміші, піни) активно проводяться. На відміну від температур спалаху й температур самозаймання таких систем, для оцінювання яких є аналітичні або емпіричні підходи, для температур займання інформації вкрай мало. Відсутній аналіз залежності температури займання бінарної суміші рідких палив від її складу та фізико-хімічних властивостей чистих компонентів (температури кипіння, теплоти випаровування, стехіометричні коефіцієнти).

Мета статті (постановка завдання) – дослідити вплив стехіометричного відношення між паром та киснем і зміни складу бінарних сумішей на їх температуру займання. Окремо будуть розглянуті водні розчини горючих легкозаймистих рідин і бінарні розчини горючих рідини.

Методи дослідження. Експериментальні значення температури займання сумішей рідин отримуються методом відкритого тиглю, а саме: визначають найменшу температури суміші, при якій у разі піднесення джерела тепла на її поверхні виникає стійке горіння. Для аналітичного оцінювання використовуються закони тепломасопереносу для краплі рідини в газовому середовищі.

Результати дослідження

Займання водних розчинів. Тиск насиченої пари p_s визначається з рівняння Клаузіуса-Клапейрона. Отримати класичну залежність p_s від температури

$$p_{fs0} = P_0 \exp \left(\frac{L_m \mu_f}{R} \left(\frac{1}{T_{boil}} - \frac{1}{T} \right) \right) \quad (1)$$

можна за умови, що теплота пароутворення є сталою величиною та рівністю тиску насиченої пари й атмосферного тиску при температурі кипіння. Аналогічні степеневі залежності проявляються в емпіричних залежностях у формі Антуана (див. таблицю 1), іноді з різними коефіцієнтами Антуана в різних температурних інтервалах [21]. Водочас теплота пароутворення при зміні температури від стандартної до температури кипіння зменшується приблизно на 10%. У роботі [18] у законі Клаузіуса-Клапейрона запропоновано використовувати лінійну залежність теплоти пароутворення від температури (розклад формули Ватсона):

$$L_m = L_{mb} - B(T - T_{boil}), \quad B = \frac{0,38 L_{mb}}{T_{cr} - T_{boil}}. \quad (2)$$

Тут L_{mb} – питома теплота пароутворення рідини при температурі кипіння рідини, T_{cr} – критична температура рідини.

У результаті використання (2) вдалося отримати аналітичну залежність для тиску насиченої пари $p_{fs0}(T)$ для індивідуальної рідини:

$$p_{fs0} = P_0 \cdot \left(\frac{T}{T_{boil}} \right)^{\frac{B \mu_f}{R}} \exp \left(\frac{[L_{mb} + B T_{boil}] \mu_f}{R} \left(\frac{1}{T_{boil}} - \frac{1}{T} \right) \right). \quad (3)$$

Недоліком отриманої залежності тиску насиченої пари від температури є представлення її у вигляді добутку степеневої й експоненти ареніусівського типу, що значно ускладнює її використання в аналітичних розрахунках.

Фізико-хімічні властивості рідин [2; 22]

Рідина	β	L_m , при T_{boil} , кДж/кг	T_{boil} , °C	T_{cr} , °C	IgP_s (P_s в кПа, T в К)	T_{flash} , °C	T_{fire} , °C
Ацетон C_3H_6O	4	502	56,4	235,5	6,38–1282/($T-36$)	-18	-5
Метанол CH_3OH	1,5	1100	64,9	239,5	7,35–1660/($T-27$)	6	13
Етанол C_2H_5OH	3	838	78,4	243,0	7,81–1919/($T-21$)	16	18
2-пропанол C_3H_7OH	4,5	664	82,4	235,6	7,51–1733/($T-41$)	11,7	21
1-пропанол C_3H_7OH	4,5	691	97,2	236,7	7,44–1752/($T-48$)	23	30
1-бутанол C_4H_9OH	6	585	29	288,6	8,72–2265/($T+7$)	29	43
n-октан C_8H_{18}	12,5	299	126	296,0	6,09–1380($T-61$)	14	19
n-декан $C_{10}H_{22}$	15,5	273	174	344,4	6,52–1810($T-45$)	47	66

Відмінність в інтервалі температур ($295 \div T_{boil}$) формули (3) та емпіричної залежності при більш низьких температурах становить до 5%.

В основі знаходження температури займання рідини будемо використовувати припущення, що біля поверхні рідини виконується стехіометричне відношення між паром та киснем $Y_f / Y_{O_2} \Big|_{cmex}$ для виникнення горіння парів. Тут Y_f , Y_{O_2} – відносні масові концентрації горючого газу й кисню. Якщо прийняти, що $A_f + \beta O_2 \rightarrow \nu_1 CO_2 + \nu_2 H_2O$ є брутто-рівнянням хімічної реакції, то $Y_f / Y_{O_2} \Big|_{cmex} = \mu_f / \nu \mu_{O_2}$. Тут прийнято, що окислення є повним і кінцевими продуктами окислення вуглеводнів є вуглекислий газ і вода. Це припущення є прийнятним з огляду на невисокі температури займання, коли спостерігається кінетичний режим окислення.

У цьому випадку ми розглядаємо водний розчин горючої рідини. Використаємо закони Рауля й Дальтона, рівняння Менделєєва-Клапейрона для суміші парів рідини, води та повітря (азот і кисень):

$$p_{fs} = Z_f \cdot p_{fs0}, P_0 = p_f + p_w + p_{O_2} + p_{N_2},$$

$$p_{ws} = (1 - Z_i) \cdot p_{ws0},$$

$$p_{O_2} / p_{N_2} = x_{O_2} / (1 - x_{O_2}) = 21 / 79, p_f V = \frac{m_f}{\mu_f} RT_g,$$

$$p_{O_2} V = \frac{m_{O_2}}{\mu_{O_2}} RT_g, P_0 V = \frac{m}{\mu} RT_g.$$

Зазвичай досліджують такі розчини, де температура кипіння легкозаймистої рідини менша за температуру кипіння води. Тоді вода є інертним компонентом розчину і її частка в газовій суміші Y_{ws} поблизу краплі значно менша за частку легкозаймистої рідини ($Y_{ws} \ll Y_{fs}$).

Тоді відношення масових часток парів рідини та кисню поблизу поверхні краплі при займанні дорівнює:

$$\frac{Y_{fs}}{Y_{O_2s}} \Big|_{cmex} = \frac{Z_f \frac{\mu_f}{\mu} p_{fs0}}{x_{O_2} \mu_{O_2} (1 - Z_f p_{fs0})} = \frac{\mu_f}{\beta \mu_{O_2}}. \quad (4)$$

Тут x_{O_2} – мольна частка кисню в середовищі, μ_f , μ_{O_2} , μ – молярна маса парів, кисню та суміші, кг/моль. Тут узятно $x_{O_2} = 0,21$ (повітря), Z_f – молярна частка ЛЗР у суміші, p_{fs0} – тиск насиченої пари над чистою ЛЗР.

Для отримання залежності температури займання рідини від масової частки горючої рідини у водному розчині зручно використати обернену залежність $Z_f(T_{fire})$, яку з (4) з урахуванням (1) представимо у вигляді:

$$Z_f = \frac{P_0}{p_{fs0} \left(\frac{\beta}{x_{O_2}} + 1 \right)} = \frac{\exp \left(\frac{L_m \mu_f}{T_{boil} R} \left(\frac{T_{boil}}{T_{fire}} - 1 \right) \right)}{\left(\frac{\beta}{x_{O_2}} + 1 \right)}. \quad (5)$$

Як об'єкти для порівняння взяті дані Сабрі (Sabri) [11] щодо температури займання (firepoint) водних розчинів ацетону, метанолу, етанолу, 1-пропанолу і 2-пропанолу. Фізико-хімічні властивості, які використовувалися при розрахунку, наведені в таблиці 1. Усі наведені ЛЗР мають температуру кипіння меншу за 100 °C.

На рисунку 1 представлені розрахункові залежності температури займання для вказаних водних розчинів. Загалом динаміка збільшення температури займання зі збільшенням частки води добре узгоджується з наявними експериментальними даними. Для деяких речовин (етанол, метанол) наявні відхилення (біля 5 °C), що можна пояснити впливом методу вимірювання на кількісні характеристики температури займання. Автори [11] наводять результати власних теоретичних розрахунків fire point (криві 1', 2', 4', 5', рисунок 1), але вони узгоджуються з експериментальними результатами значно гірше.

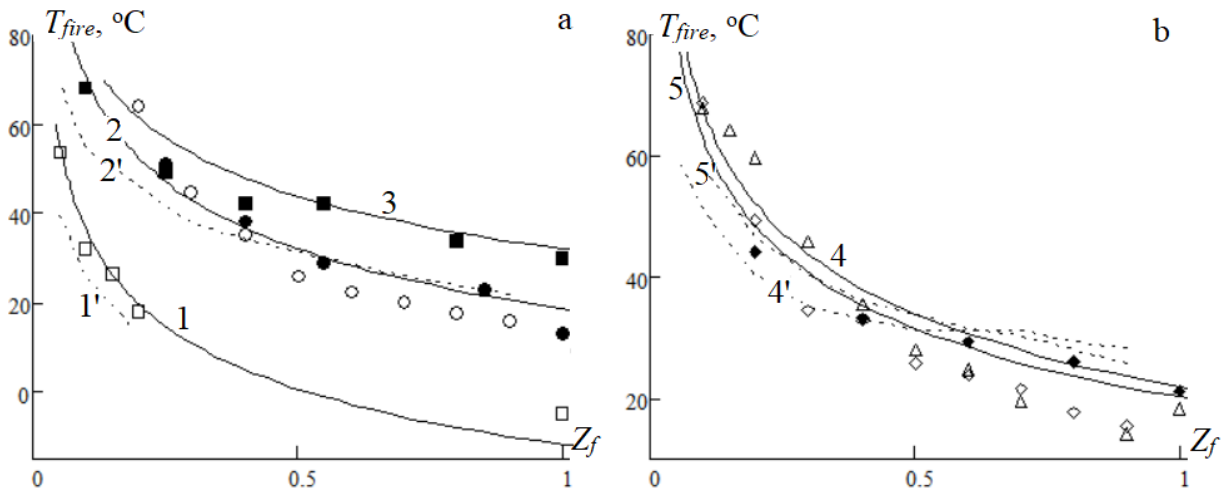
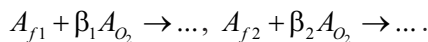


Рис. 1. Залежність температури займання водного розчину ЛЗР від масової частки горючої рідини. Суцільна криві – розрахунок по (5), пунктир – теоретичні значення [11], точки – експеримент: 1 – ацетон, □[11]; 2 – метанол, ●[2], ○[11]; 3 – 1-пропанол, ■[2]; 4 – етанол, ◆[2], ◇[11]; 5 – ізопропанол, △[11]

Загалом можна відмітити, що наявність у розчині 50% води збільшує температуру її займання на 10 °С.

Займання бінарних розчинів. У цьому разі можливі умовно два випадки: температури займання компонентів розчину 1) суттєво відрізняються або 2) близькі. У першому випадку можна припустити, що важколетючий компонент практично не випаровується за наявності більш летючого компонента. Тому його можна вважати інертним компонентом і використати формулу (5) для оцінювання температури займання розчину.

Однак при збільшенні вмісту більш важколетючого компонента його вже не можна вважати інертним компонентом. Він також бере участь к займанні краплі. Аналогічна ситуація відповідає й другому вказаному випадку. Тому для врахування впливу обох компонентів на умови займання прийемо, що два компоненти реагують згідно з брутто-рівняннями:



Припустимо також, як і для індивідуальних рідин, що при температурі займання біля поверхні краплі має виконуватися стехіометричне відношення між паром та киснем для кожного компонента:

$$Y_{1s} / Y_{O_2,1} = \mu_1 / \beta_1 \mu_{O_2} \Big|_{cmex} \text{ та } Y_{2s} / Y_{O_2,2} = \mu_2 / \beta_2 \mu_{O_2} \Big|_{cmex}.$$

При цьому сума $Y_{O_2,1} + Y_{O_2,2} = Y_{O_2s}$ є масовою часткою кисню біля поверхні краплі. У результаті умова стехіометрії набирає вигляду:

$$Y_{1s} \frac{\beta_1 \mu_{O_2}}{\mu_1} + Y_{2s} \frac{\beta_2 \mu_{O_2}}{\mu_2} = Y_{O_2s}. \quad (6)$$

Визначимо масову частку кисню в суміші. Використовуємо рівняння Менделєєва-Клапейрона та Дальтона:

$$p_{f1}V = \frac{m_1}{\mu_1} RT_g, p_{f2} = \frac{m_2}{\mu_2} RT_g, p_{O_2} = \frac{m_{O_2}}{\mu_{O_2}} RT_g,$$

$$P_0 = p_{f1} + p_{f2} + p_{O_2} + p_{N_2}.$$

У результаті для масової частки кисню в суміші маємо:

$$Y_{O_2s} = \frac{m_{O_2}}{m_g} = \frac{p_{O_2} \mu_{O_2}}{P_0 \mu} = \frac{x_{O_2} \mu_{O_2}}{\mu} \left(1 - \frac{p_{f1} + p_{f2}}{P_0} \right).$$

Спільно із законом Рауля масові частки парів рідин біля поверхні рідини визначаються:

$$Y_{1s} = Z_1 \frac{\mu_1 p_{1s0}}{\mu P_0} \text{ і } Y_{2s} = (1 - Z_1) \frac{\mu_2 p_{2s0}}{\mu P_0}.$$

У результаті (6) представимо у вигляді залежності мольної частки першого компонента в бінарному розчині від температури займання:

$$Z_1 = \frac{1 - \left(\frac{\beta_2 + 1}{x_{O_2}} \right) \exp \left(\frac{L_m \mu_f}{RT_{boil,2}} \left(1 - \frac{T_{boil,2}}{T_{fire}} \right) \right)}{\left(\frac{\beta_1 + 1}{x_{O_2}} \right) \exp \left(\frac{L_m \mu_f}{R} \left(1 - \frac{T_{boil,1}}{T_{fire}} \right) \right) - \left(\frac{\beta_2 + 1}{x_{O_2}} \right) \exp \left(\frac{L_m \mu_f}{RT_{boil,2}} \left(1 - \frac{T_{boil,2}}{T_{fire}} \right) \right)}. \quad (7)$$

Для порівняння вибрані дані Ішіді (Ishida) [20] для розчину октану й декану, а також власні результати для розчину етанолу й 1-бутанолу. У цих двох парах ЛЗР температури займання компонентів суттєво відрізняються, що дасть змогу прослідкувати динаміку впливу складу розчину.

Температури займання розчину спиртів отримували на стандартній установці за визначенням температури займання у відкритому тиглі. Особливістю було використання невеличкого фарфорового тигля (об'ємом 10 мл) для розчину. Він розміщувався в більшому металевому тиглі, який містив пісок і нагрівався електропідією. Для контролю температури використовувався

ртутний контактний термометр, який уставлявся в розчин.

На рисунку 2 представлені результати розрахунку за формулам (5) і (7). Спостерігається монотонна зміна значення температури займання при зміні складу бінарного розчину. При суттєвій відмінності температур займання двох компонентів (більше ніж 20 °С) важколетючий компонент можна вважати інертним при його вмісті в розчині менше ніж 50 %. Чим менша ця різниця, тим більша виникає похибка.

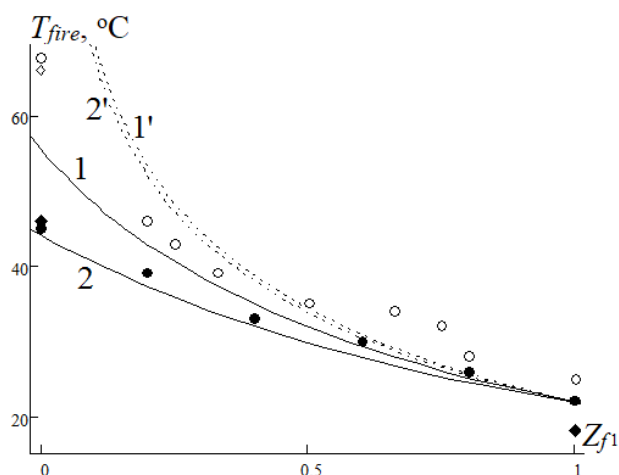


Рис. 2. Залежність температури займання бінарного розчину ЛЗР від масової частки більш летючого (першого) компонента. Суцільна крива – розрахунок за (7), пунктир – розрахунок за (5), точки – експеримент: 1 – н-октан – н-декан, \circ [20], \diamond [2]; 2 – етанол-бутанол, \blacklozenge [2], \bullet

Висновки та пропозиції з перспективами подальших досліджень. У роботі запропоновано методику розрахунку температури займання бінарних розчинів легкозаймистих речовин, у тому числі і їх водних розчинів. Вона основана на припущенні, що при температурі займання біля поверхні краплі має виконуватися стехіометричне відношення між парою та киснем для кожного компонента. Цей підхід дає змогу отримувати аналітичну залежність частки компонента в бінарному розчині від температури займання й так урахувати не тільки залежність насиченого пару рідини від температури, а й температурну залежність питомої теплоти пароутворення. Порівняння з експериментальними результатами дають задовільні результати. Наприклад, при зміні частки води від 0 до 90% і температури займання в межах 60 градусів похибка в її розрахунках могла досягати до 5 °С.

Отримані аналітичні залежності представлені в такому вигляді, що для розрахунку аналогічної залежності можна використовувати температурну

залежність тиску насиченої пари й в іншому вигляді, наприклад, у формі Антуана.

Недоліком аналітичних залежностей є неможливість урахувати особливості саме експериментальних підходів у визначенні температури займання рідин. Доволі часто буває, що для однієї й тієї самої речовини різні автори отримують результати щодо температури займання, що відрізняються на 3–8 °С, як, наприклад, для 1-бутанолу: 50 [12] і 44 °С [2].

Важливим питанням залишається аналітичне визначення температур займання водних розчинів важколетючих горючих рідин, наприклад, емульсій: вода/мазут, вода/масло чи вода/дизельне паливо. Такі водно-паливні емульсії є перспективним альтернативним паливом та активно зараз досліджуються.

Список літератури

- Li Yee Phoon, Azizul Azri Mustafa, Haslenda Hashim and Ramli Mat. A Review of Flash Point Prediction Models for Flammable Liquid Mixtures. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2014. № 53. P. 12553–12565. dx.doi.org/10.1021/ie501233g.
- NFPA 30 Flammable and Combustible Liquids Code 2021 Edition. 167 p. URL: <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=30>.
- Pei X., Guida P., AlAhmadi K. M., Al Ghamdi I. A., Saxena S., Roberts W. L. Cenosphere formation of heavy fuel oil/water emulsion combustion in a swirling flame *Fuel Processing Technology*. 2021. 216. P. 106800 <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106800>.
- Kichatov B., Korshunov A., Kiverin A., Ivanov M. Effect of ultrasonic emulsification on the combustion of foamed emulsions. *Fuel Processing Technology*. 2018. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.10.001>.
- Hristova M., Damgaliev D. Flash point of organic binary mixtures containing alcohols: experiment and prediction. *Open Chemistry*. 2013. № 11 (3). doi: 10.2478/s11532-012-0171-6.
- Vazquez V., Migvia del C. Binary mixture flammability characteristics for hazard assessment Texas A&M University. 2005. 102 p. URL: <http://hdl.handle.net/1969.1/2536>.
- Skřínský J., Dolníček P., Skřínková M., Marek J., & Lukešová P. Flashpoint Prediction for Binary Mixtures of Alcohols with Water in Order to Improve their Safety *Chemical Engineering & Technology*. 2015. № 38 (4). P. 727–733. doi: 10.1002/ceat.201400663.
- Cao W., Pan Y., Liu Y., Jiang J. A novel method for predicting the flash points of binary mixtures from molecular structures. *Safety Science*. 2020. № 126. P. 104680. doi: 10.1016/j.ssci.2020.104680.
- Torabian E., Sobati M. A. New models for predicting the flash point of mixtures containing

different alcohols Process Safety and Environmental Protection. 2017. № 111. P. 439–448. doi: 10.1016/j.psep.2017.07.020.

10. Jones J. C. A Means of Calculating the Fire Points of Organic Compounds. *Journal of Fire Sciences*. 2001. № 19 (1). P. 62–68. doi: 10.1106/wpr5-59cg-x75u-gqcd.

11. From Flash and Fire Points of Water Miscible Flammable Liquid Mixtures to a Novel Method of Membrane Characterization. *Waseem Sabri*. Thesis. Ottawa, Canada, 2022. 92 p. URL: <http://dx.doi.org/10.20381/ruor-28545>.

12. Roberts A. F., Wuince B. W. A Limiting condition for the burning of flammable liquids Combustion and Flame. 1973. № 20 (2). P. 245–251. doi: 10.1016/s0010-2180(73)80178-6.

13. Dong-Myeong Ha, Jong-Geun Han, Sung-Jin Lee A Study on Flash Points and Fire Points of Acids Using Closed Cup and Open-cup Apparatus Journal of Korean Institute of Fire Sci. & Eng. 2006. № 3.

14. Dong-Myeong Ha, Dong-Myeong Ha, Lee Sung-Jin, Song Young-Ho. Measurement of Fire Point and Flash Point for Alcohols Using Tag Open-Cup Apparatus Journal of the Korean Society of Safety. 2004. № 19 (4).

15. Thomas D. S. Critical Analysis and Review of Flash Points of High Molecular Weight Poly-Functional C, H, N, O Compounds: Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science. Texas A&M University, 2011. 115 p.

16. Britton L. G. Using heats of oxidation to evaluate flammability hazards. *Process Safety Progress*. 2002. № 21 (1). P. 31–54. doi: 10.1002/prs.680210108.

17. Martel B. Chemical Risk Analysis: A Practical Handbook. L. : Kogan Page Science, 2004. 528 p.

18. Калінчак В. В., Черненко О. С., Копійка О. К. Удосконалення аналітичної оцінки температур займання рідин. *Пожежна безпека (Fire Safety)*. 2023. № 4. С. 43–49. DOI: 10.32447/20786662.42.2023.05.

19. Теорія розвитку й припинення горіння : практикум / О. В. Тарахно, Д. Г. Трегубов, К. В. Жернокльов та інші. Харків : НУЦЗУ, 2010. Частина II. 314 с.

20. Ishida H., Iwama A. Some Critical Discussions On Flash And Fire Points Of Liquid Fuels. *Fire Safety Science*. 1986. № 1. P. 217–226. doi: 10.3801/IAFSS.FSS.1-217.

21. Stephenson, R. M., Malanowski, S. Handbook of the Thermodynamics of Organic Compounds, 1987. doi: 10.1007/978-94-009-3173-2.

22. David R. Lide CRC Handbook of Chemistry and Physics 85 hted. CRC Press, Jun 29, 2004. Science, 2712 p. <https://doi.org/10.1021/ja041017a>.

References

1. Li Yee Phoon, Azizul Azri Mustafa, Haslenda Hashim, & Ramli Mat (2014). A Review of Flash Point

Prediction Models for Flammable Liquid Mixtures Ind. Eng. Chem. Res. 53, 12553–12565. [dx.doi.org/10.1021/ie501233g](https://doi.org/10.1021/ie501233g). [in English].

2. NFPA 30 Flammable and Combustible Liquids Code 2021 Edition. 167 p. <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=30>. [in English].

3. Pei, X., Guida, P., AlAhmadi K. M., Al Ghamdi I. A., Saxena S., & Roberts W. L. (2021). Cenosphere formation of heavy fuel oil/water emulsion combustion in a swirling flame Fuel Processing Technology. 216. 106800 <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106800>. [in English].

4. Kichatov B., Korshunov A., Kiverin A., Ivanov M. (2018). Effect of ultrasonic emulsification on the combustion of foamed emulsions Fuel Processing Technology. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.10.001>. [in English].

5. Hristova, M., & Damgaliev, D. (2013). Flash point of organic binary mixtures containing alcohols: experiment and prediction. Open Chemistry. 11(3). doi: 10.2478/s11532-012-0171-6. [in English].

6. Vazquez V., Migvia del C. (2005). Binary mixture flammability characteristics for hazard assessment Texas A&M University. 102 p. <http://hdl.handle.net/1969.1/2536>. [in English].

7. Skřínský, J., Dolníček, P., Skřínská, M., Marek, J., & Lukešová, P. (2015). Flashpoint Prediction for Binary Mixtures of Alcohols with Water in Order to Improve their Safety Chemical Engineering & Technology. 38 (4), 727–733. doi: 10.1002/ceat.201400663. [in English].

8. Cao, W., Pan, Y., Liu, Y., & Jiang, J. (2020). A novel method for predicting the flash points of binary mixtures from molecular structures Safety Science. 2020. 126, 104680. doi: 10.1016/j.ssci. 104680. [in English].

9. Torabian, E., & Sobati, M. A. (2017). New models for predicting the flash point of mixtures containing different alcohols Process Safety and Environmental Protection. 111, 439–448. doi: 10.1016/j.psep.2017.07.020. [in English].

10. Jones, J. C. (2001). A Means of Calculating the Fire Points of Organic Compounds. Journal of Fire Sciences. 19(1), 62–68. doi: 10.1106/wpr5-59cg-x75u-gqcd. [in English].

11. From Flash and Fire Points of Water Miscible Flammable Liquid Mixtures to a Novel Method of Membrane Characterization *Waseem Sabri* Thesis. (2022). Ottawa, Canada, 92 p. <http://dx.doi.org/10.20381/ruor-28545>. [in English].

12. Roberts, A. F., & Wuince, B. W. (1973). A Limiting condition for the burning of flammable liquids Combustion and Flame. 20 (2), 245–251. doi: 10.1016/s0010-2180(73)80178-6. [in English].

13. Dong-Myeong Ha, Jong-Geun, Han, Sung-Jin, Lee. (2004). A Study on Flash Points and Fire Points of Acids Using Closed Cup and Open-cup Apparatus Journal of Korean Institute of Fire Sci. & Eng. 2006. 20, № 3. [in English].

14. Dong-Myeong, Ha, Dong-Myeong, Ha, Lee, Sung-Jin, & Song, Young-Ho. (2004). Measurement of Fire Point and Flash Point for Alcohols Using Tag Open-Cup Apparatus Journal of the Korean Society of Safety. 19 (4). [in English].
15. Thomas D. S. (2011). Critical Analysis and Review of Flash Points of High Molecular Weight Poly-Functional C, H, N, O Compounds: Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science. Texas A&M University, 115 p. [in English].
16. Britton, L. G. (2002). Using heats of oxidation to evaluate flammability hazards. Process Safety Progress. 21 (1), 31–54. doi: 10.1002/prs.680210108. [in English].
17. Martel B. Chemical Risk Analysis: A Practical Handbook. L. : Kogan Page Science, 2004. 528 p. [in English].
18. Kalinchak V. V., Chernenko A. S., Kopyika O. K. (2023). Udoshkonalennia analitychnoi otsinky temperatur zaimannia ridyn [Improvement of the analytical determination of fire point liquids: *Fire Safety Fire Safety*. № 4. 43–49. doi: 10.32447/20786662.42.2023.05. [in Ukrainian].
19. Tarakhno O. V., Trehubov D. H., Zhernoklov K. V., Shepeleva A. I., Kovrehin V. V. Teoriia rozvytku y prypynennia horinnia. [Theory of development and cessation of combustion.] Practicum Part II: /Kh., 2010. 314 p. [in Ukrainian].
20. Ishida, H. & Iwana, A. (1986). Some Critical Discussions On Flash And Fire Points Of Liquid Fuels. *Fire Safety Science*. 1: 217–226. doi: 10.3801/IAFSS.FSS.1-217. [in English].
21. Stephenson, R. M., & Malanowski, S. Handbook of the Thermodynamics of Organic Compounds, 1987. doi:10.1007/978-94-009-3173-2 [in English].
22. David R. (2004). Lide CRC Handbook of Chemistry and Physics 85 hted. CRC Press, Jun 29, Science, 2712 p. <https://doi.org/10.1021/ja041017a>. [in English].

© О. С. Черненко, В. В. Калінчак, М. О. Иванов, О. К. Копійка, 2024.

Науково-методична стаття.

Надійшла до редакції 13.09.2024.

Прийнято до публікації 18.12.2024.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

БАЛАНЮК Володимир Мірчович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, начальник кафедри кафедри хімії та фізики горіння, доктор технічних наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0853-4229>

БАЛЛО Ярослав В'ячеславович, Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, заступник начальника відділу нормативно-технічного забезпечення науково-дослідного центру протипожежного захисту, доктор технічних наук, старший дослідник, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9044-1293>

ВЕЛИКИЙ Андрій Євгенович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, старший викладач кафедри безпілотних систем та роботизованої техніки, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-5987-9745>

ВЕЛИКИЙ Назарій Романович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, ад'юнкт денної форми навчання докторантури-ад'юнктури, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7967-4491>

ВЕЛИКИЙ Ярема Богданович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, старший викладач кафедри пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт, кандидат педагогічних наук, yaremavelikiy@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3241-5211>

ВОВК Сергій Ярославович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, докторант докторантури-ад'юнктури, кандидат технічних наук, доцент, Sergiy_vovk@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5278-3754>

ГАВРИЛЮК Андрій Федорович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, докторант ЛДУБЖД, кандидат технічних наук, доцент, gavrilyk3@ukr.net, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8727-9950>

ГАЙДУК Максим Олександрович, начальник дослідно-випробувальної лабораторії АРЗ СП ГУ ДСНС України у Хмельницькій області, аспірант ЛДУБЖД, fireman-expert@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-5248-322X0>

ГІРСЬКИЙ Олег Ігорович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, ад'юнкт, i.oleg@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6225-0601>

ГУЗАР Назарій Ігорович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, ад'юнкт, huzarnazarii@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7189-6545>

ДЗЮБА Лідія Федорівна, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, професор кафедри прикладної математики і механіки, доктор технічних наук, професор, l.dzuba@ldubgd.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4261-6490>

ДОМІНІК Андрій Михайлович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, заступник начальника факультету з навчально-наукової роботи, кандидат технічних наук, доцент, dominik.andrij@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0139-2002>

ІВАНОВ Михайло Олександрович, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, аспірант кафедри фізики та астрономії, mivanov.sva@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1547-4067>

КАЛІНЧАК Валерій Володимирович, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, професор кафедри фізики та астрономії, valerykalinchak@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6030-6007>

КОБКО Євген Васильович, професор кафедри управління та адміністрування навчально-наукового інституту права та психології Національної академії внутрішніх справ, доктор юридичних наук, професор, evgeniykobko@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3121-0823>

КОВАЛИШИН Василь Васильович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, професор кафедри цивільного захисту, доктор технічних наук, професор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5463-0230>

КОВАЛИШИН Володимир Васильович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, доцент кафедри ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, кандидат технічних наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3739-8668>

КОПІЙКА Олександр Кузьмич, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, доцент кафедри фізики та астрономії, kopiuka@onu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9802-2256>

КОПЧАК Богдан Любомирович, Національний університет «Львівська політехніка», професор кафедри електромехатроніки та комп'ютеризованих електромеханічних систем, доктор технічних наук, професор, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2705-8240>

КУШНІР Андрій Петрович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, доцент кафедри наглядово-профілактичної діяльності та пожежної автоматики, кандидат технічних наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6946-8395>

ЛАВРЕНЮК Олена Іванівна, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, професор кафедри фізики та хімії горіння, доктор технічних наук, доцент, olaw@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4509-2896>

ЛАЗАРЕНКО Олександр Вікторович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, заступник начальника кафедри наглядово-профілактичної діяльності та пожежної автоматики, кандидат технічних наук, доцент, o.lazarenko@ldubgd.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0500-0598>

ЛИН Андрій Степанович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, доцент кафедри пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт, кандидат технічних наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000/0002/4012/4556>

ЛУЩ Василь Іванович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, начальник кафедри пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт, кандидат технічних наук, доцент, v.lushch@ldubgd.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5931-3181>

МИРОШКІН Володимир Сергійович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, ад'юнкт, miroxa11@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3907-6945>

МИХАЛІЧКО Борис Миронович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, професор кафедри фізики та хімії горіння, доктор хімічних наук, професор, mykhalitchko@email.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5583-9992>

НАГІРНЯК Юрій Михайлович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, ад'юнкт денної форми навчання, unagirniak@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9966-5560>

ОКСЕНТЮК Віра Миколаївна, Національний університет «Львівська політехніка», доцент кафедри систем автоматизованого проектування, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1491-6946>

ПАЗЕН Олег Юрійович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, начальник кафедри наглядово-профілактичної діяльності та пожежної автоматики, кандидат технічних наук, o.pazen@ldubgd.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1655-3825>

ПАСТУХОВ Павло Васильович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, науковий співробітник науково-дослідної лабораторії пожежної безпеки, кандидат технічних наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3140-1101>

ПИКУС Віктор Сергійович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, аспірант, pukys@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8850-9068>

РОМАНІК Богдан Андрійович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, курсант 4-го курсу факультету пожежної та техногенної безпеки, bodka110569@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5586-8630>

СЕРЕДА Дмитро Володимирович, Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, старший науковий співробітник відділу досліджень, статистики пожеж та надзвичайних ситуацій науково-дослідного центру протипожежного захисту, seredadmitriy2019@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9645-5864>

ФРЕЮК Дмитро Васильович, Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького, цикл безпеки життєдіяльності і цивільного захисту, старший викладач, frejukdima@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7076-3431>

ЧЕРНЕНКО Олександр Сергійович, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, професор кафедри фізики та астрономії, chernalex@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3722-0694>