



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; **Птак 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. Гедіміна, 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:**  
**Контактний телефон:**  
**E-mail:**

ЛДУБЖД, вул. Клепарівська, 35, м. Львів, 79007  
(099) 60 66 532  
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 60x84<sup>8</sup>. 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. Інглезі, 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. Пікус, 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  
ТЕПЛОВОГО 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. Луц, 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. Середя, 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

**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

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

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

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

**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](mailto: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 «Петех» 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% АFFF), 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.

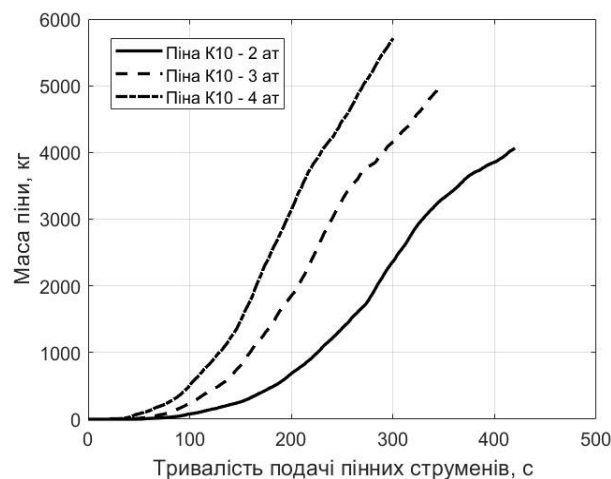
Проведений аналіз дає змогу стверджувати, що є доцільність виконати дослідження для

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 м<sup>3</sup>. 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. Прийнемо 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:

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

$$Q_m = 15,2 \text{ кг/с;}$$

$$Q_v = 190 \text{ дм}^3/\text{с;}$$

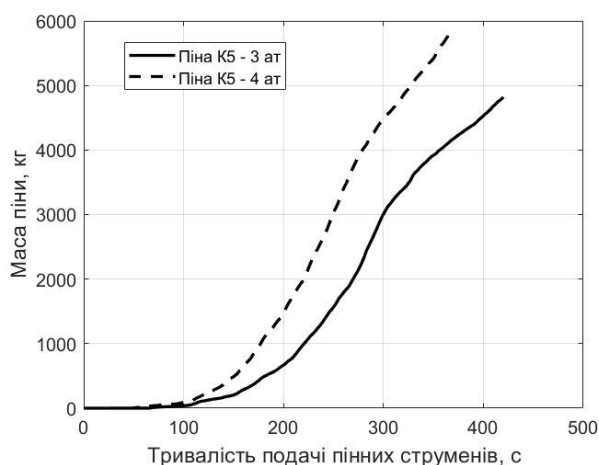


Рис. 2. Графічна залежність маси піни K5 на дзеркалі горіння від часу її подавання й тиску

$Q_m$  – масова витрата піни, кг/с;

$Q_v$  – об'ємна витрата піни, дм<sup>3</sup>/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.

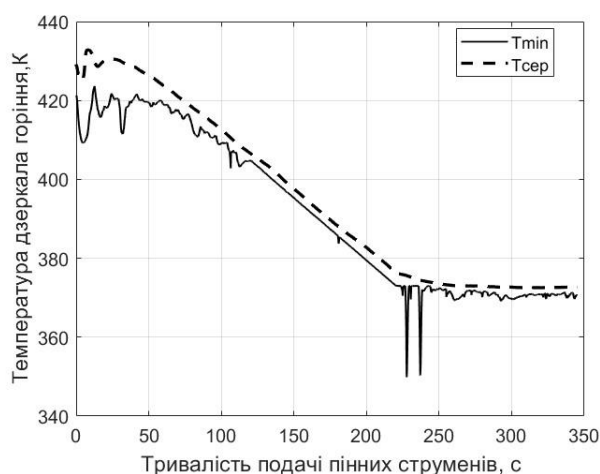


Рис. 3. Температура середовища на дзеркалі горіння (піна K10, 3 атм)



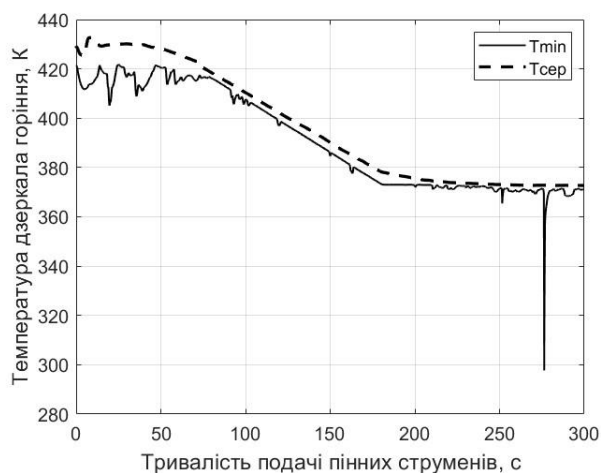


Рис. 4. Температура середовища на дзеркалі горіння (піна K10, 4 атм)

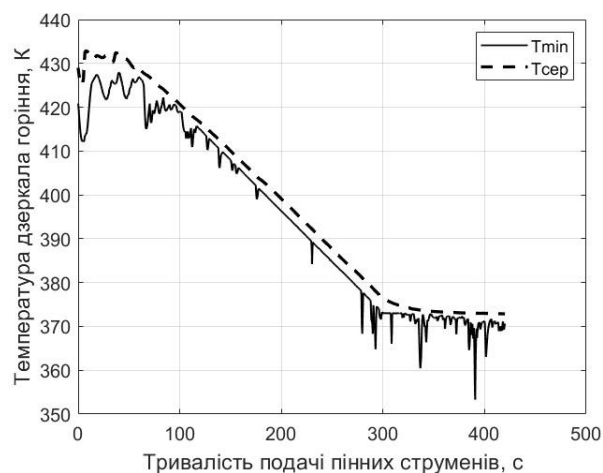


Рис. 5. Температура середовища на дзеркалі горіння (піна K5, 3 атм)

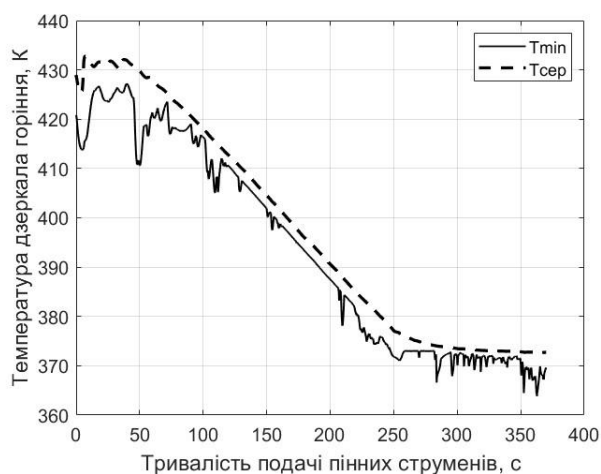


Рис. 6. Температура середовища на дзеркалі горіння (піна K5, 4 атм)

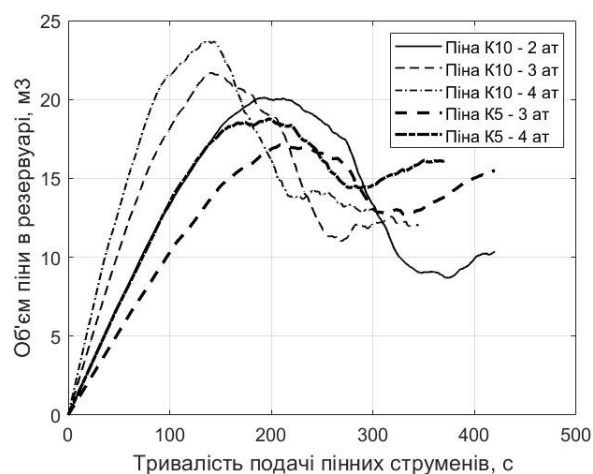


Рис. 7. Графічна залежність об'єму піни в резервуарі від часу при різних кратності піни й тиску

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 різних кратності піни й тиску.

Як бачимо з рис. 7, максимальне значення об'єму піни в резервуарі становить 20–24 м<sup>3</sup> у випадку піни K10 і 17–19 м<sup>3</sup> 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                       |

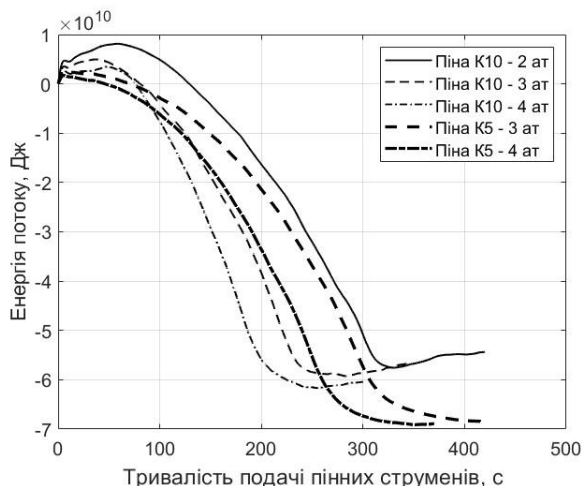


Рис. 8. Залежність енергії конвективного теплового потоку від часу при різній кратності піни й тиску

На рис. 9 представлено залежність маси бензину в резервуарі від тривалості подавання піниних 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/м<sup>3</sup>.

Значення деяких показників взято з досліджень [12]:

1) у випадку використання піни K10  $V_{\text{доп}}$  становить 51 м<sup>3</sup>;

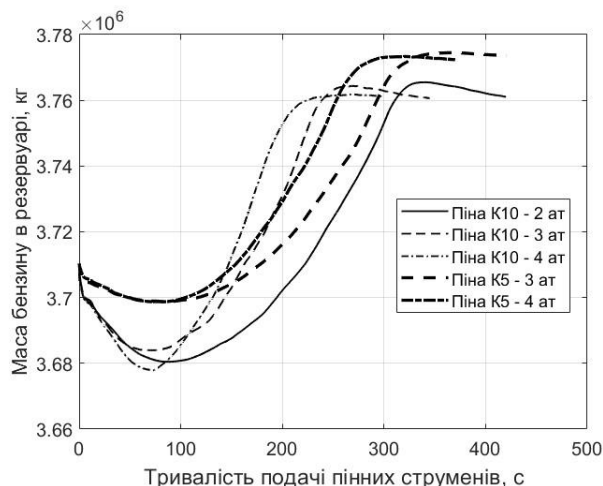


Рис. 9. Графічна залежність маси бензину в резервуарі від часу при різній кратності піни й тиску

2) у випадку використання піни K5  $V_{\text{доп}}$  становить 20 м<sup>3</sup>.

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 м<sup>3</sup> (12,7%);

2) у випадку гасіння піною K5  $V_{\text{рез}}$  становить 670 м<sup>3</sup> (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 не вигідним 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](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/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](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 stikosti ta kratnosti kompresiinoi piny [Research of stability and expansion of compression foam]. *Fire Safety*, 43, 34–40. <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.